

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Definição de uma metodologia em SIG para a produção de
cartografia de suscetibilidade a encandeamento solar na rede
viária urbana: O caso de estudo da segunda circular**

Alexandre Miguel Bernardo Rodrigues

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações

Trabalho de Projeto orientado por:
Prof. Doutora Cristina Maria de Sousa Catita
Prof. Doutora Paula Maria Ferreira de Sousa Cruz Redweik

Agradecimentos

Quero agradecer às minhas orientadoras, Prof. Doutora Cristina Catita e Prof. Doutora Paula Redweik pelo apoio e disponibilidade que demonstraram ao longo deste projeto, sem este apoio seguramente não teria sido possível. Agradecer aos meus pais pela oportunidade que me deram ao poder vir “de tão longe” tirar um mestrado. Sem esta oportunidade o mestrado continuaria a ser apenas uma meta bem distante lá no horizonte. Finalmente quero agradecer aos meus amigos pelo apoio que me deram ao longo desta jornada.

Índice

Agradecimentos.....	i
Índice	ii
Resumo	iv
Abstract.....	v
Índice de figuras	vi
Índice de tabelas.....	viii
Índice de gráficos	ix
1 – Introdução e objetivos.....	1
1.1– Motivação	1
1.2– Objetivos do trabalho	1
1.3 – Estrutura do relatório	2
2 - Estado da arte.....	3
3 – Metodologia.....	7
3.1 – Preparação dos dados e correções topológicas	12
3.1.1 – Geometria da rede	12
3.2.2 – Atributos da rede.....	12
3.2.3 – Correção automática de declives	16
3.3 – Preparação dos dados para cálculo do encandeamento solar.....	18
3.3.1 – Criação de pastas com os ID dos nós dos troços.....	22
3.3.2 – Produção dos <i>rasters</i> de declive e rumo	23
3.3.3 – Criação de envelopes de cada troço grande para os veículos ligeiros e pesados	24
3.4 Cálculo da suscetibilidade da 2ª Circular a encandeamento solar e discussão de resultados.....	29
3.4.1 – Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular e discussão de resultados.....	30
3.4.2 – Nó do Eixo Norte-Sul	36
3.4.3 – Troço 55_57: Azinhaga das Galhardas.....	41
3.4.4 – Início da 2ª Circular no sentido IC19 – A1, troço 4_1.....	45
3.5 – Acidentes rodoviários na 2ª Circular e encandeamento solar	48
4 – Discussão, conclusões, propostas de melhoria e perspetivas de trabalhos futuros	51
4.1 - Discussão	51
4.2 – Conclusões	51
4.3 – Propostas de melhoria.....	52
4.4 – Perspetivas de trabalhos futuros.....	55

5 - Referências bibliográficas	56
---	-----------

Resumo

A segurança rodoviária é algo de extrema importância na prática da condução. Para isso é necessária uma atenção total por parte dos condutores e isso implica o uso dos sentidos. O sentido mais importante na prática da condução é a visão. Porém, este sentido pode ser perturbado devido ao encandeamento solar, reduzindo assim parcialmente ou totalmente a capacidade do condutor de ver a via e os perigos que estão a sua frente. O amanhecer, com o nascer do sol, e o anoitecer, com o pôr do sol, são dois períodos críticos em que o fenómeno de encandeamento ganha maiores proporções devido à baixa altura do sol, ficando este no campo de visão dos condutores infligindo assim encandeamento nos mesmos. Sendo que o amanhecer e o anoitecer são períodos em que o fluxo rodoviário está no seu auge, este fenómeno torna-se um grave perigo nas estradas.

O objetivo deste trabalho é a definição de uma metodologia, em sistemas de informação geográfica, capaz de produzir cartografia da suscetibilidade rodoviária a encandeamento solar. Foi utilizada, como caso de estudo, a 2ª Circular de Lisboa, devido à sua geometria espacial propícia a encandeamento solar e por ser uma via importante da cidade de Lisboa. Para o efeito, foram calculados parâmetros importantes para cada troço da via na zona de estudo por forma a calcular a ocorrência de encandeamento solar com o uso do algoritmo GLARE2019 em desenvolvimento na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa pela doutora Paula Redweik.

Com a metodologia proposta neste trabalho, foi possível obter de forma sistemática e organizada a cartografia de suscetibilidade a encandeamento solar dos troços da 2ª Circular de Lisboa, podendo esta ser utilizada como forma de prevenção ou alerta para os condutores que nela circulam preparando-se de antemão para este perigo.

Palavras-chave: Encandeamento solar, SIG, Prevenção, Segurança Rodoviária, Cartografia de suscetibilidade.

Abstract

Road safety is of paramount importance in driving practice. For this it is necessary a total attention on the part of the drivers and this implies use of the senses. The most important sense in the practice of driving is vision. However, this sense can be disturbed due to the solar glare, thus partially or totally reducing the driver's ability to see the road and the dangers in front of him. The dawn, with the sunrise, and the dusk, with the sunset, are two critical periods in which the phenomenon of glare gains greater proportions due to the low height of the sun, being this in the field of vision of the conductors inflicting glare. Since dawn and dusk are periods when the road flow is at its peak, this phenomenon becomes a serious danger on the roads.

The objective of this work is the definition of a methodology, in geographic information systems, capable of producing cartography of road susceptibility to solar glare. It was used, as a case study, the 2nd Circular in Lisbon, due to its spatial geometry propitious to solar glare and for being an important route of the city of Lisbon. For this purpose, relevant parameters were calculated for each section of the track in the study area in order to calculate the occurrence of solar glare using the GLARE2019 algorithm under development at the Faculty of Sciences of the University of Lisbon by Dr. Paula Redweik.

With the methodology proposed in this work, it was possible to obtain in a systematic and organized way, the mapping of susceptibility to solar glare of sections of the 2nd Circular, which could be used as a form of prevention or alert for the drivers that circulate in it preparing beforehand for this danger.

Keywords: Solar Glare, GIS, Road Security, Road Hazards, Prevention, Susceptibility Mapping

Índice de figuras

Figura 1 - As vias mais perigosas de Lisboa. Fonte: Prevenção Rodoviária Portuguesa, abril 2018. Edição do diário de notícias online	2
Figura 2 – Workflow do sistema de deteção de encandeamento solar. Adaptado de Aune 2017.	4
Figura 3 – Interação entre o sistema de deteção de encandeamento solar e o software QGIS. Adaptado de Aune (2017).	5
Figura 4 – Fluxograma de determinação encandeamento solar rodoviário. Fonte Henriques (2016).....	5
Figura 5 – Secção da 2ª Circular em estudo	8
Figura 6 – Modelo digital de Terreno da zona da 2ª Circular	9
Figura 7 - Modelo digital de superfície da zona da 2ª Circular	10
Figura 8 - Workflow da metodologia de trabalho	11
Figura 9 - Nós e arcos da 2ª Circular.	12
Figura 10 - Tabela de atributos da shapefile da 2ª circular.....	13
Figura 11 – Representação esquemática dos passos necessários de forma a adicionar os ID's dos nós da 2ª Circular aos troços da 2ª Circular.	14
Figura 12 - Tabela de atributos para cada troço pequeno com todos os parâmetros calculados.....	15
Figura 13 - Erro no declive quando há mudança de troço grande.....	16
Figura 14 - Fluxograma do script python produzido para correção de outliers nos valores dos declives dos troços pequenos.....	17
Figura 15 - Buffer de 15m dos troços pequenos de 5m. Exemplo do rumo início-fim	18
Figura 16 - Rumo início-fim em formato raster.....	19
Figura 17 - Resumo do workflow do modelo criado	20
Figura 18 - Modelo automático, PREPDADOSIF desenvolvido no model builder do software ArcMap.	21
Figura 19 - Parte do modelo responsável pela criação de pastas e bounding boxes	22
Figura 20 - Exemplo de uma bounding box	23
Figura 21 - Parte do modelo responsável pela produção dos ficheiros finais do declive e rumo	23
Figura 22 - Parte do modelo responsável pela produção do raster binário e envelopes finais. Maior resolução na página 20.....	24
Figura 23 - Exemplo de um raster binário	25
Figura 24 – Resultado do cálculo do rumo do modelo apresentado.....	26
Figura 25 - Resultado do cálculo do declive do modelo apresentado.....	27
Figura 26 - Calculo da junção da faixa de 15m do MDT+altura do veículo ligeiro e envolvente MDS	28
Figura 27 - Traçado da 2ª Circular em estudo	30
Figura 28 – Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular na direção início-fim.....	32
Figura 29 - Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular na direção início-fim.....	33
Figura 30 - Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular	34
Figura 31 - Valores estatísticos para o encandeamento da 2ª Circular. O grid_code do campo field representa o número de horas de encandeamento solar de cada entrada na tabela de atributos.	35
Figura 32 - Representação 3D da suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular.	35
Figura 33 - Nó Eixo Norte-Sul/ 2ª Circular	36
Figura 34 - Troços em estudo do Nó Eixo Norte-Sul/ 2ª Circular	37
Figura 35 – Suscetibilidade a encandeamento solar no nó Eixo Norte-Sul/ 2ª Circular	40
Figura 36 - Troço 55_57: Azinhaga das Galhargas	41

Figura 37 - Suscetibilidade a encandeamento solar no troço 55_57	42
Figura 38 - Fenómenos pontuais de encandeamento no troço 55_57	44
Figura 39 - Troço 4_1	45
Figura 40 - Suscetibilidade a encandeamento solar no troço 4_1	47
Figura 41 - Acidentes na 2ª Circular e sua envolvente.....	48
Figura 42 – Acidentes ocorridos nas faixas de rodagem da 2ª Circular no troço em estudo	49
Figura 43 - Exemplo de um mapa de encandeamento com reduzido número de pixéis em que se verifica encandeamento	53
Figura 44 - Exemplo de um mapa de encandeamento com reduzido número de pixels em que se verifica encandeamento. Maior resolução	54
Figura 45 - Número total de pixels em que se verifica encandeamento para o troço 5_9 no dia 1 às 7 da manhã.	54

Índice de tabelas

Tabela 1 - Dados de entrada do projecto	7
Tabela 2 - Total de situações de encandeamentos num ano por hora do dia na 2ª Circular	31

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Situações de encandeamento ao longo de um ano na 2ª Circular	31
Gráfico 2 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 45_44	38
Gráfico 3 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 45_43	38
Gráfico 4 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 45_46	39
Gráfico 5 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 45_47	39
Gráfico 6 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 55_57	43
Gráfico 7 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 4_1	46
Gráfico 8 – Numero de acidentes ocorridos em cada classe de suscetibilidade a encandeamento solar.	50
Gráfico 9 - Número de acidentes ocorridos em cada classe de suscetibilidade a encandeamento solar e numero de acidentes por extensão de cada classe de suscetibilidade.	50

1 – Introdução e objetivos

1.1 – Motivação

Todos os anos ocorrem milhares de acidentes nas estradas portuguesas. Segundo os relatórios da Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR), a velocidade excessiva é das causas principais para a sinistralidade automóvel nas estradas. O consumo excessivo de álcool é outro fator que influencia negativamente a capacidade de condução. Dados do Ministério da Justiça indicam que, em 2013, este foi o terceiro crime mais praticado nesse ano.

Em Portugal, desconhecem-se quaisquer relatórios ou documentos que façam a ligação direta entre o encandeamento solar e acidentes rodoviários. Porém os relatórios da ANSR contêm informação, entre outras, sobre a hora dos acidentes. Consultando esses documentos, é possível observar que, para o distrito de Lisboa, no ano de 2017, no período compreendido entre as 6 da manhã e as 9 da manhã, foram registados 918 acidentes que causaram vítimas, 6 das quais mortais. No período da tarde, das 18h às 21h, foram registados 1588 acidentes, 5 dos quais resultaram em casos mortais. Embora não se possa estabelecer uma ligação direta entre o fenómeno de encandeamento solar e estas duas estatísticas, é um facto que, no período da manhã, os veículos que circulam na direção Oeste-Este têm uma probabilidade maior de serem encadeados pelo sol baixo após o nascer do sol, e os que circulam durante o período do final da tarde, têm maior probabilidade de serem encadeados pelo sol baixo antes do pôr do sol se circularem na direção Este-Oeste, podendo ser o encandeamento solar o fator responsável pela sinistralidade registada. Assim sendo, é importante o estudo do encandeamento solar nas estradas, de forma a assegurar que os condutores saibam que vão circular numa estrada que está sujeita a fenómenos de encandeamento solar no intervalo de tempo em que circulam, podendo assim de antemão irem prevenidos para a viagem. Este projeto por outro lado poderá ser também utilizado para o estudo de medidas preventivas de carácter permanente apoiando os decisores, que gerem o sistema rodoviário urbano, a reunir elementos necessários para implementarem sinalética adequada nos troços de via mais problemáticos., ou colocarem barreiras solares para que os condutores não sejam subitamente encadeados pelo sol baixo, ao entrarem numa faixa que reúne as condições para serem alvo de encandeamento solar, quando a faixa em que circulavam anteriormente não reunia essas condições. Sendo possível a modelação do encandeamento solar espacialmente e temporalmente, este estudo poderá ser também utilizado para procurar vias alternativas que não sofram de problemas de encandeamento solar.

1.2 – Objetivos do trabalho

Este projeto tem como objetivo principal a definição de uma metodologia em Sistemas de informação geográfica (SIG) para classificação da rede viária urbana relativamente à suscetibilidade ao encandeamento solar. Para o efeito, são usados: dados da rede viária urbana em formato vetorial (*shapefile*), dados de relevo obtidos por *Light Detection And Ranging* (LiDAR) em formato matricial (*Raster*) com 1m de resolução espacial, e um algoritmo, GLARE2019, em desenvolvimento por Paula Redweik na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, para o cálculo da presença de encandeamento solar. Cada arco da rede viária foi dividido em troços de 5m, nos quais foi determinado existência/ausência de encandeamento para um condutor a todas as horas do dia de todos os dias do ano, em função do azimute e do declive do troço, das coordenadas locais do sol e das sombras causadas pela envolvente ao troço. A dimensão dos troços de 5m (designados neste projeto por troços pequenos) foi escolhida em função do comprimento médio dos automóveis.

Estes dados são então combinados e analisados em ambiente SIG, produzindo assim diversos produtos cartográficos que caracterizam a rede viária urbana relativamente à sua suscetibilidade a encandeamento solar. Neste estudo, usou-se como área teste a zona abrangida pela 2ª Circular da cidade de Lisboa, por ser uma artéria da cidade com um volume de tráfego muito elevado, apresentar uma orientação aproximadamente Este-Oeste e ser uma das vias com maior número de acidentes rodoviários da cidade, como indicado pela Figura 1.

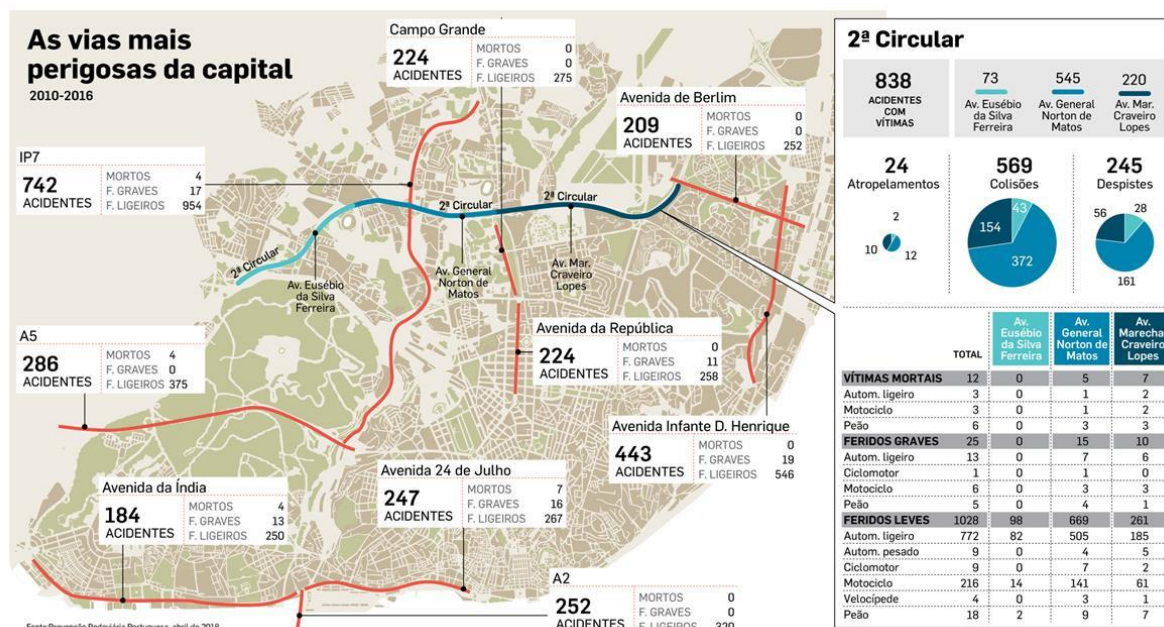


Figura 1 - As vias mais perigosas de Lisboa. Fonte: Prevenção Rodoviária Portuguesa, abril 2018. Edição do diário de notícias *online*

1.3 – Estrutura do relatório

Este relatório encontra-se estruturado em quatro diferentes capítulos com vários subcapítulos. O primeiro é composto pela introdução onde são apresentadas as motivações e os objetivos que levaram à realização do projeto.

O segundo capítulo aborda o estado da arte da temática em estudo, onde será apresentado um resumo de trabalhos desenvolvidos previamente nesta área.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia aplicada. É neste capítulo que também serão apresentados os resultados e análise dos mesmos.

Finalmente o quarto capítulo encontra-se dividido em 4 diferentes subcapítulos, em que são abordadas algumas propostas de melhoria à metodologia desenvolvida, tecidas conclusões, e por último são apresentadas algumas propostas de trabalho futuro.

2 - Estado da arte

O encandeamento solar, segundo Cline e Hofsetter (1997), é definido como um brilho intenso ou sensação de luz brilhante que produz incômodo ou interfere na visão. Sendo a visão o sentido mais importante para a prática de uma condução segura, é fácil perceber o quão grave esta situação pode tornar-se para os condutores. O mesmo é comprovado pela comparação estatística efetuada por Choi e Singh (2005) que demonstram que o encandeamento, quer pelas luzes dos faróis dos carros, quer pelo sol, aumenta significativamente a possibilidade de acidente. O mesmo resultado foi comprovado por um estudo de Hagita e Mori (2013) em que os resultados mostraram que devido a encandeamento existia um aumento dos acidentes entre bicicleta e pedestres na zona de Chiba no Japão.

Uma investigação realizada por Jurado-Pina e Pardillo Mayora em 2010 (2010) conclui que existem vários fatores que determinam a ocorrência de encandeamento solar ao longo de uma estrada, tais como a posição do sol relativa aos olhos do condutor, a direção da linha de visão do condutor e a configuração do terreno.

Outros estudos, como o de Frederico Henriques (2016) que co-desenvolveu um algoritmo dinâmico de encandeamento solar rodoviário em contexto urbano em 2016, aponta para fatores semelhantes, mas também para a tipologia do veículo, se pesado ou ligeiro, pois a altura da linha de visão varia consoante a tipologia do veículo. Também o campo de visão é um fator a considerar, pois varia com a idade do condutor, e existe uma perda da visão periférica com o aumento da idade.

Ao nível de trabalhos onde os SIG foram empregues de forma a calcular a suscetibilidade das redes viárias a encandeamento solar, destacam-se dois trabalhos com metodologias distintas. Li *et al.* (2018) propõe um cálculo do encandeamento solar rodoviário com imagens do Google *street view* (GSV), uma vez que estas imagens são similares ao que os condutores veem na estrada. Para tal, foi utilizada uma rede neuronal convolucional para segmentar as imagens extraídas e classificar as mesmas (definir a classificação e a orientação). Seguidamente, os autores desse estudo utilizaram a imagem do Google *street view* classificada e consideraram os parâmetros do sol, como a altura solar e o azimute solar, para determinar se num determinado local e a uma determinada hora existia a possibilidade de encandeamento solar. Os resultados desta metodologia foram depois projetados, sob a forma de pontos, para a rede viária da área de estudo em questão. Estes pontos foram seguidamente classificados segundo um código de cores, em que cada cor representa a duração do encandeamento naquele ponto.

O outro trabalho que utiliza SIG para calcular a suscetibilidade do encandeamento solar rodoviário foi desenvolvido em 2017 por Kjetil Aune, com uma metodologia semelhante à adotada neste projeto. Neste trabalho, o autor desenvolveu o sistema *Sun Glare Detection System* (Aune, 2017), Sistema de deteção de encandeamento solar. O *workflow* deste sistema pode ser observado na figura 2.

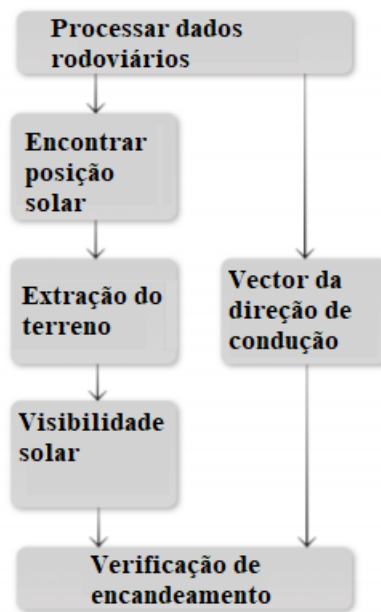


Figura 2 – Workflow do sistema de detecção de encandeamento solar. Adaptado de Aune 2017.

O sistema referido assenta em três *inputs* de base: o primeiro é a rede viária em questão onde o sistema consegue calcular o vetor da direção de condução em cada posição pretendida. São calculados também os parâmetros da posição solar (altura e azimuth) para o momento e posição pretendidos.

O segundo *input* é um modelo digital de terreno da zona da rede viária. Com estes dados, o sistema, através do uso do algoritmo de Bresenham e do teste de oclusão, pode verificar se o sol estava visível num determinado local a uma determinada hora. Finalmente, uma vez calculados todos os parâmetros de posição solar e visibilidade solar, e considerando a direção de condução, é verificado se o sol se encontra no campo de visão de um condutor, determinando assim se os condutores estavam sujeitos, ou não, a situações de encandeamento solar.

Todo o trabalho de Aune foi desenvolvido de forma a poder ser utilizado interactivamente no *software* QGIS como observado na figura 3.

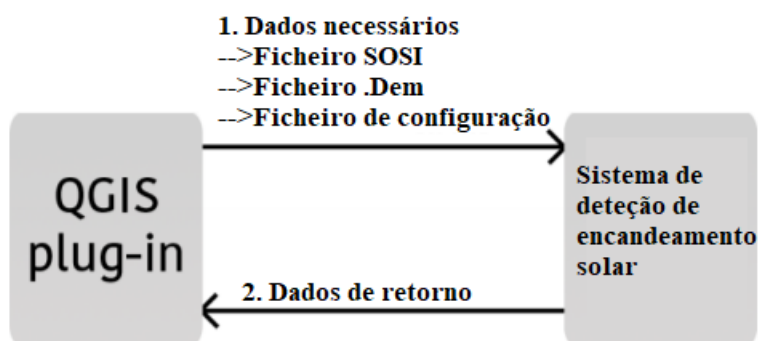


Figura 3 – Interação entre o sistema de detecção de encandeamento solar e o *software* QGIS. Adaptado de Aune (2017).

Este trabalho de Kjetil Aune segue uma metodologia semelhante à apresentada neste projeto, todavia, apresenta algumas diferenças que serão abordadas no capítulo final.

Outro trabalho que serviu de base a este projeto foi o de Henriques (2016). Este autor seguiu uma abordagem para a produção dinâmica de um mapa de Encandeamento Solar Rodoviário (ESR) que correspondesse a alguns objetivos do seu trabalho tais como:

- O desenvolvimento de um método computacional automatizado preciso capaz de prever, dinamicamente ao longo do ciclo anual, os segmentos de troço rodoviário, em contexto urbano, nos quais os condutores são sujeitos ao encandeamento solar;
- A determinação dinâmica dos troços rodoviários, em períodos temporais estipulados pelo utilizador, que constituam ocorrência classificável de ESR aos condutores, dependendo do seu sentido de circulação no troço rodoviário, considerando a altimetria da envolvente urbana;
- A classificação cartográfica dos segmentos de troço rodoviário representativos de ESR como indicador de zonas rodoviárias críticas de vulnerabilidade ao ESR.

Com estes objetivos o autor desenvolveu um algoritmo capaz de calcular o encandeamento solar rodoviário para uma zona de Lisboa. Para o efeito, o autor utilizou como dados descritos na figura 4.

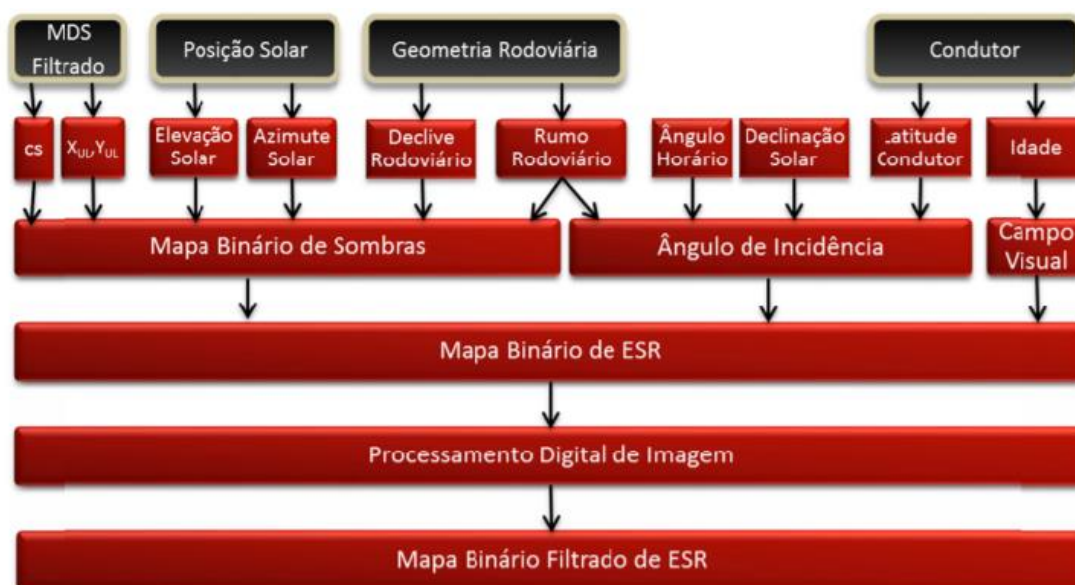


Figura 4 – Fluxograma de determinação encandeamento solar rodoviário. Fonte Henriques (2016)

Na metodologia do presente projeto, são calculados alguns dos parâmetros de Henriques (2016), tais como: o rumo rodoviário e a elevação solar. Para além do modelo digital de superfície (MDS) é também empregue o modelo digital de terreno (MDT) correspondente à faixa de largura das estradas analisadas, neste caso a faixa de rodagem da 2ª Circular. Estes dados são posteriormente organizados devidamente numa base de dados geoespacial e processados, para serem utilizados pelo algoritmo GLARE2019 que calcula o encandeamento e produz os mapas de encandeamento no intervalo de tempo definido, neste caso 1h e as matrizes temporais para cada troço da 2ª Circular. Posteriormente, em ambiente SIG, é realizada uma análise com algumas estatísticas espaço-temporais aos troços, em termos de suscetibilidade, e é também produzida a respetiva cartografia de suscetibilidade.

3 – Metodologia

O presente capítulo divide-se em quatro partes principais. Na primeira parte, descrevem-se as operações realizadas para a preparação dos dados e as correções topológicas efetuadas à rede viária usada neste estudo, de modo a constituir um grafo orientado. Cada troço (arco) da rede é limitado por um nó inicial e um nó final, sendo ainda subdividido por pequenos troços de 5m cada, usados nos cálculos subsequentes. De seguida, descrevem-se as operações efetuadas para a determinação dos atributos da rede viária relevantes para o cálculo do encandeamento solar, tais como o declive e a orientação de cada troço de 5m. A geometria da rede e os seus atributos constituem os elementos fundamentais para a implementação da metodologia. Por fim, na quarta parte são apresentados os resultados obtidos pelo GLARE2019, e as análises produzidas em ambiente SIG de modo a produzir a cartografia de suscetibilidade a encandeamento solar de cada troço da rede.

Os dados de entrada utilizados encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 - Dados de entrada do projeto

Nome do ficheiro	Descrição	Metadados
TrocoG_2C.shp	Estrutura vetorial no formato <i>Shapefile</i> do eixo de via de parte da segunda circular (Fig. 5)	Cartografia 1:1000 fornecida pela Câmara Municipal de Lisboa Sistema de referência: etrs89 pt-tm06
MDT_2a_Circular.tif	Modelo digital de terreno da segunda circular (Fig. 6)	Sistema de referência: etrs89 pt-tm06 Resolução espacial: 1m Data de aquisição: 2016
MDS_2a_Circular.tif	Modelo digital de superfície da segunda circular obtido pela tecnologia LiDAR. (Fig. 7)	Sistema de referência: etrs89 pt-tm06 Resolução espacial: 1m Data de aquisição: 2016

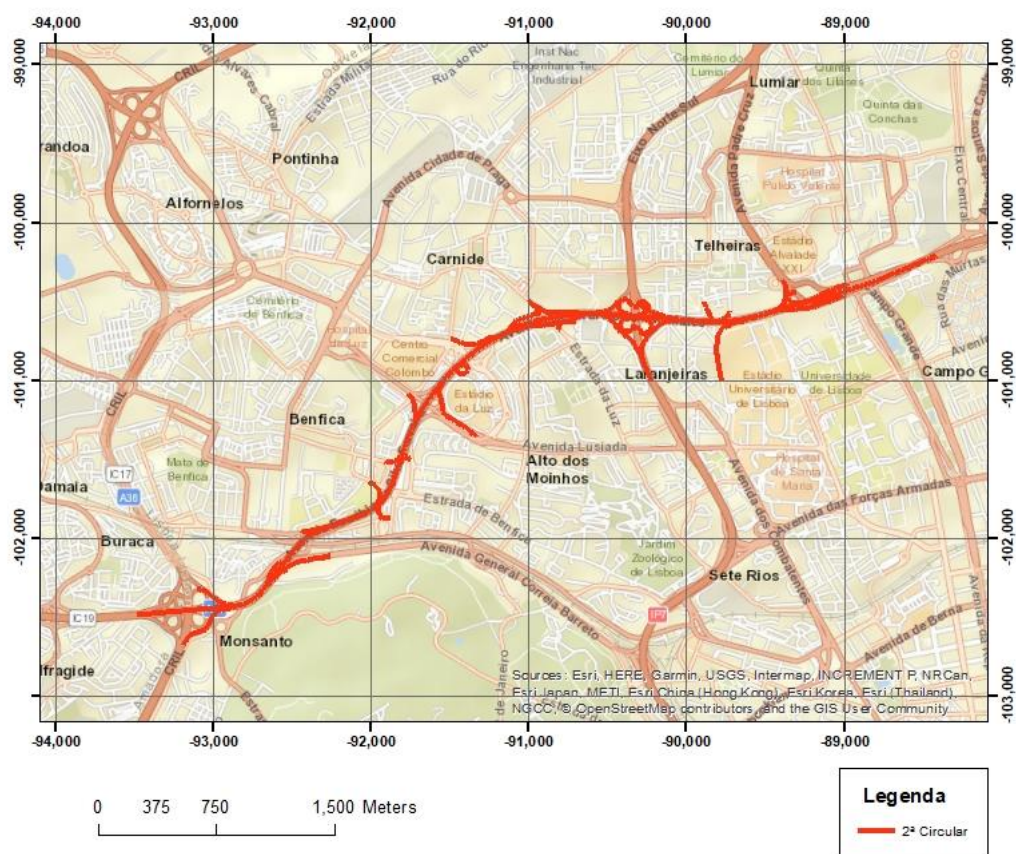


Figura 5 – Secção da 2ª Circular em estudo

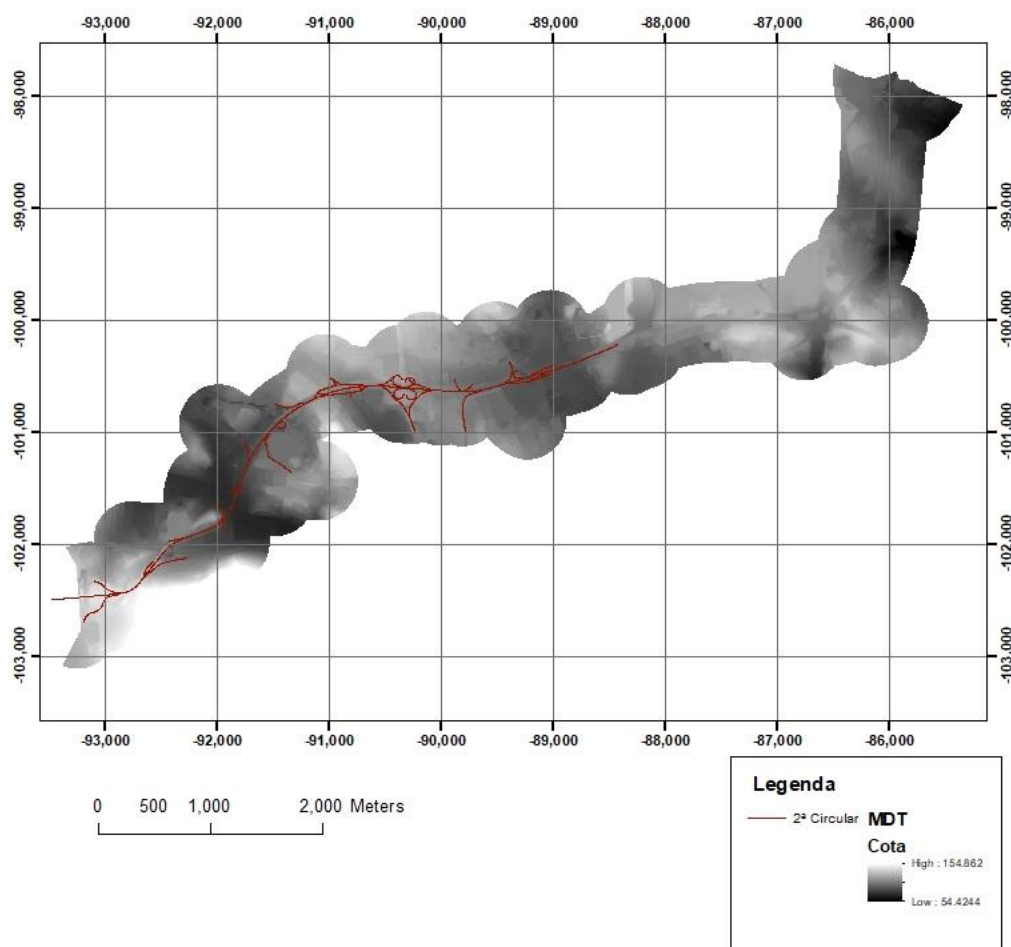


Figura 6 – Modelo digital de Terreno da zona da 2ª Circular

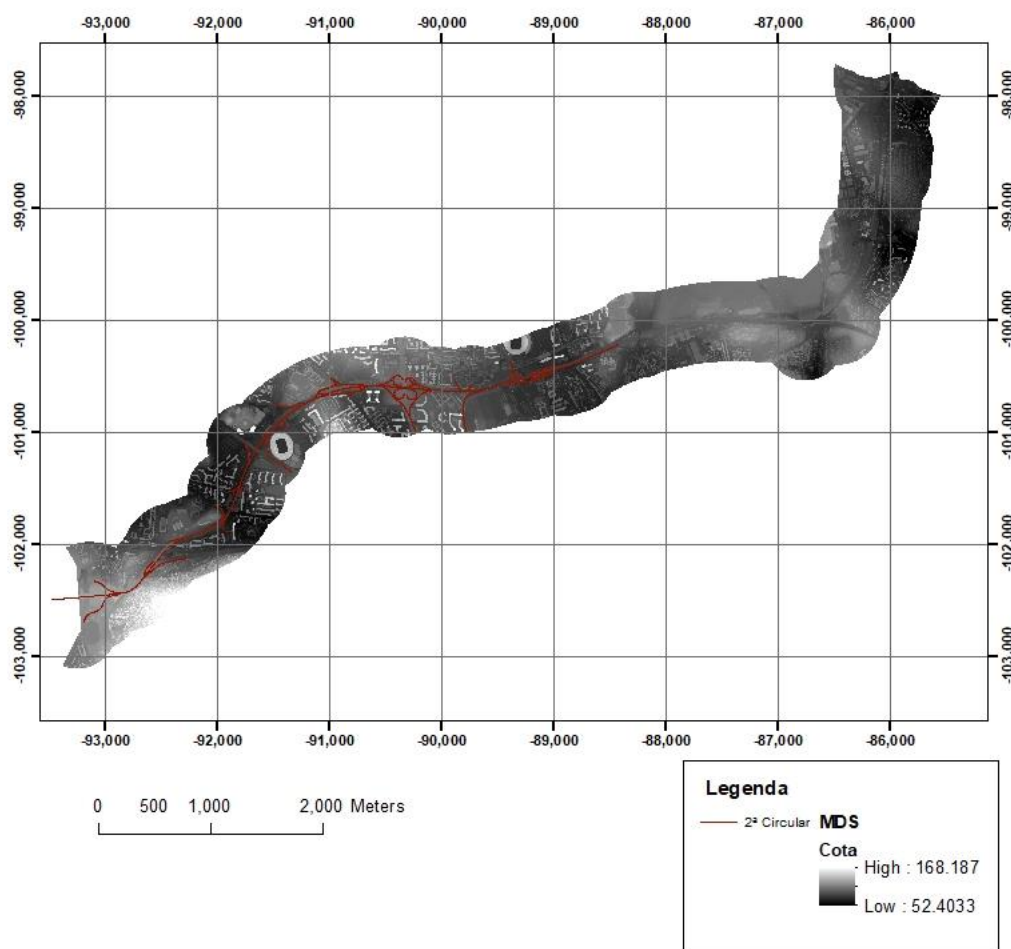


Figura 7 - Modelo digital de superfície da zona da 2ª Circular

Toda a metodologia aplicada neste trabalho encontra-se descrita de forma sucinta no *workflow* da figura 8. Cada passo do *workflow* será descrito em detalhe nas seções que se seguem.

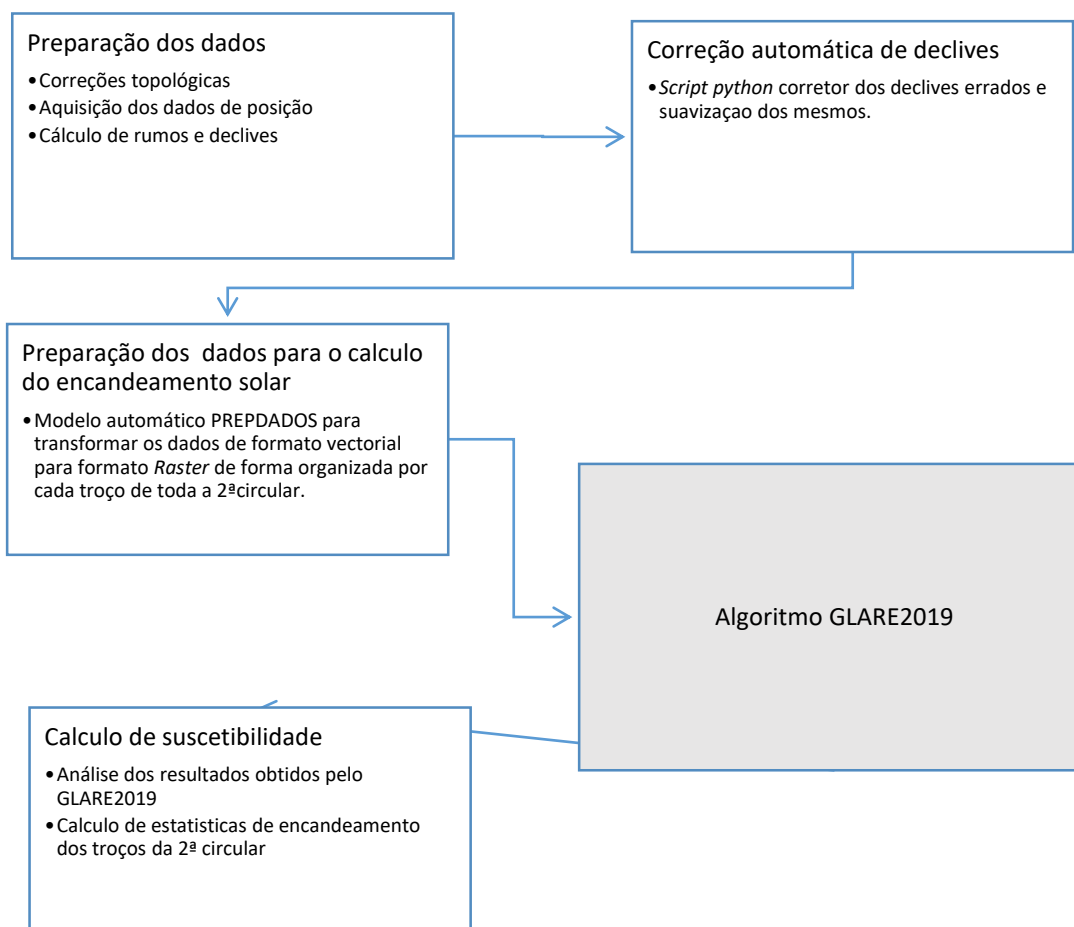


Figura 8 - *Workflow* da metodologia de trabalho

3.1 – Preparação dos dados e correções topológicas

De forma a preparar os dados e a executar as operações sobre os mesmos foram utilizados o *software* ArcMap da ESRI na sua versão 10.6, na maior parte das operações, e o *software* QGIS na versão 3.4.2 com o *plugin* *RefFunctions* para algumas operações de atualização e geração da informação alfanumérica.

3.1.1 – Geometria da rede

A geometria pretendida para a rede viária a usar nesta metodologia é armazenada numa estrutura vetorial em arco-nó idêntica a um grafo, em que cada nó corresponde a uma interseção na via e cada arco corresponde ao percurso entre dois nós. Para que cada arco correspondesse de facto ao percurso entre duas interseções na 2ª Circular, foi efetuada uma verificação topológica, de forma a identificar a existência de nós que não correspondessem de facto a intersecções. Este fenómeno de existência de nós falsos entre nós reais é denominado de *pseudo-nodes*.

Na figura 9 pode-se observar um exemplo da 2ª Circular em forma de grafo, em que cada nó é uma interseção da via e cada arco o percurso entre dois nós.

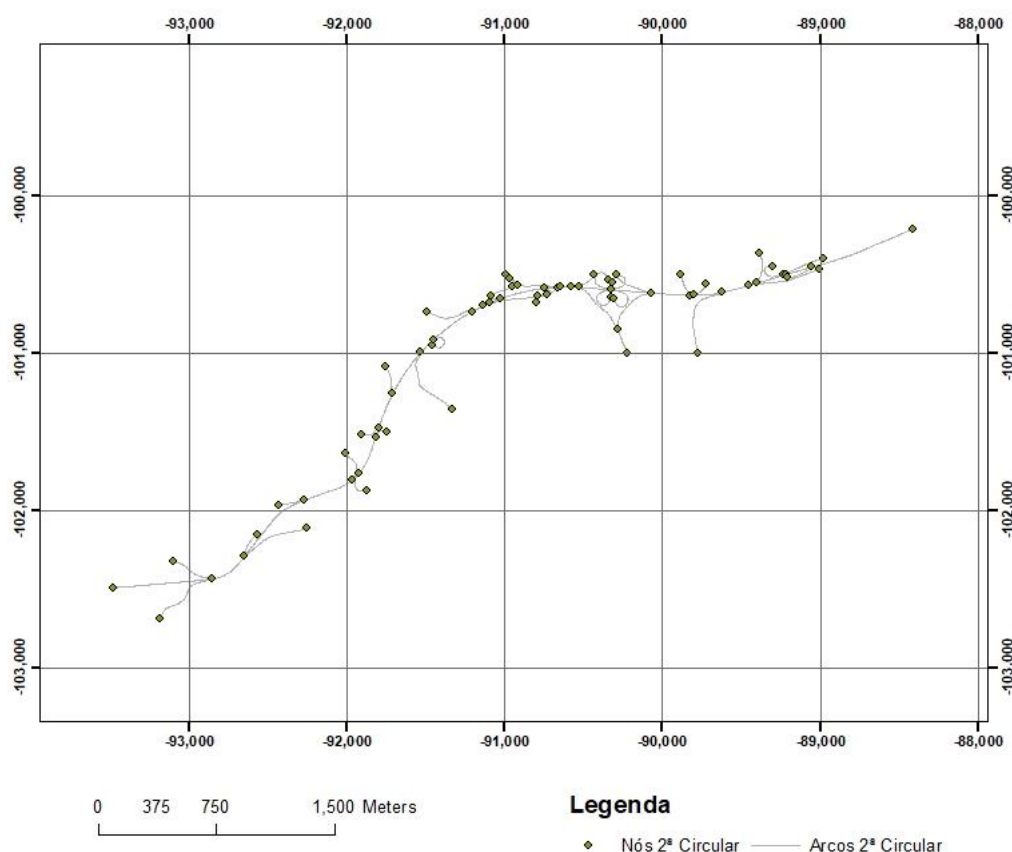


Figura 9 - Nós e arcos da 2ª Circular.

3.2.2 – Atributos da rede

De forma a identificar de forma inequívoca cada arco da 2ª Circular foram criados 3 campos na tabela de atributos da *shapefile* da 2ª Circular. São estes, "ID_TrocoG", "IF" e "FI". O "ID_TrocoG" foi criado

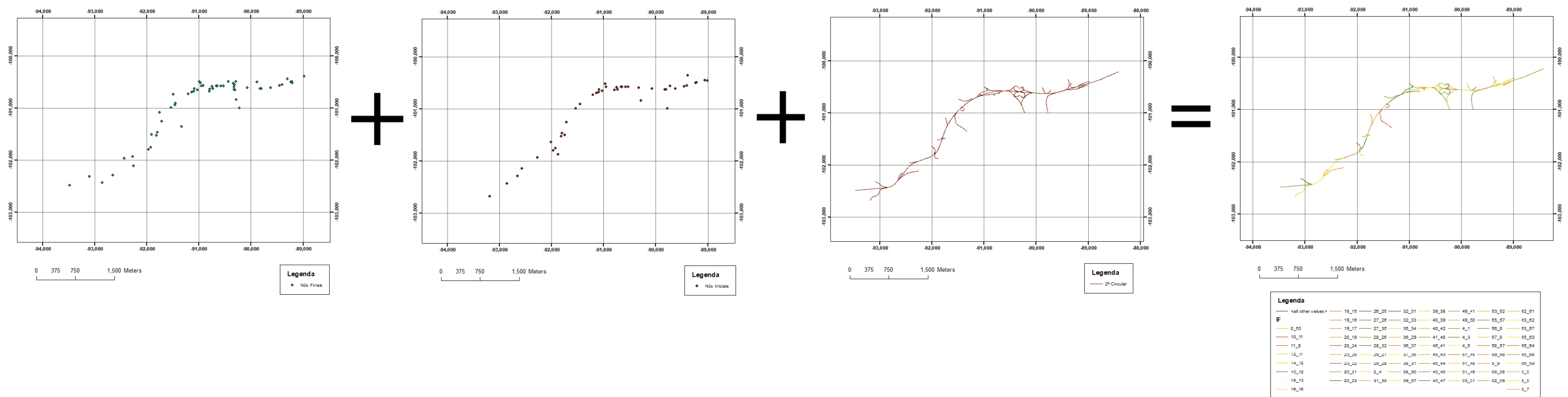
de forma a gerar um identificador numérico automático para cada troço grande (arco). “Troço grande” é a designação doravante utilizada para identificar um troço entre dois nós na 2ª Circular. “IF” e “FI” correspondem também a cada troço grande da 2ª Circular, não utilizando um identificador automático, mas sim o ID de cada nó criado anteriormente. O atributo “IF” corresponde a “ID do nó inicial “_” ID do nó final”, e o atributo “FI” corresponde ao inverso, “ID do nó final “_” ID do nó inicial”. Com “IF” e “FI” foi possível identificar quais os troços circuláveis apenas numa das direções, por exemplo as vias de entrada e de saída da 2ª Circular.

Para calcular estes ID’s dos nós iniciais e finais foram executados os seguintes passos:

1. Foi criada uma nova *shapefile* apenas com os nós da 2ª Circular onde foram calculadas as coordenadas X e Y de cada nó. Seguidamente, foi criada uma nova coluna na tabela de atributos correspondente à concatenação do par X e Y, de forma a criar uma chave única para cada nó.
2. Na *shapefile* original da 2ª Circular foram extraídos os vértices finais e iniciais de cada troço grande para duas novas *shapefiles*, respetivamente com pontos finais e pontos iniciais.
3. Nas *shapefiles* de pontos iniciais e finais, à semelhança da *shapefile* dos nós da 2ª Circular, foram calculadas as coordenadas X e Y de cada ponto e sua posterior concatenação numa nova coluna, de forma a criar uma chave única.
4. Foi executada uma operação de junção (*join*) entre a *shapefile* dos nós da segunda circular e vértices finais e iniciais, utilizando como chave o campo correspondente à concatenação de cada X e Y calculado
5. Finalmente foi executada mais uma operação de *join* agora entre a *shapefile* com os vertices iniciais e finais com a *shapefile* da 2ª Circular utilizando como chave o “ID_TroçoG” previamente calculado.
6. Por fim o nó inicial e nó final foram concatenados de forma a obter a direção do troço. A tabela de atributos da *shapefile* final pode ser observada na figura 10. A figura 11 representa esquematicamente um resumo do procedimento descrito.

	FID	Shape *	ID_TroçoG	Shape_Leng	NoInicial	NoFinal	IF	FI
	0	Polyline	1	251.558306	60	58	60_58	58_60
	1	Polyline	2	215.722937	62	61	62_61	61_62
	2	Polyline	3	110.240093	56	0	56_0	0_56
	3	Polyline	4	144.621768	53	52	53_52	52_53
	4	Polyline	5	262.848713	51	48	51_48	48_51
	5	Polyline	6	501.735033	55	57	55_57	57_55
	6	Polyline	7	343.646687	51	49	51_49	49_51

Figura 10 - Tabela de atributos da *shapefile* da 2ª circular



Nós Finais

Nós Iniciais

Troços 2ª Circular

2ª Circular com ID's dos Nós

Figura 11 – Representação esquemática dos passos necessários de forma a adicionar os ID's dos nós da 2ª Circular aos troços da 2ª Circular.

Uma vez finalizadas as operações acima descritas, os troços grandes foram divididos em pequenos troços de 5m doravante designados de “troços pequenos”. É nestes troços que serão calculados os parâmetros de orientação necessários para o algoritmo GLARE2019.

A fim de identificar cada novo troço de 5m foi criada uma nova chave automática “ID_Peq”. Em seguida foram extraídos os vértices iniciais e finais de cada um dos troços pequenos para uma nova *shapefile*, de forma a poder calcular os parâmetros necessários. Para isso foram executados os seguintes passos:

1. Foram criadas novas colunas na tabela de atributos. Estas colunas foram as seguintes: “Xinicial”; “Yinicial”; “Zinicial”; “Xfinal”; “Yfinal”; “Zfinal”; “DecliveIF”; “DecliveFI”; “RumoIF” e “RumoFI”.
2. As colunas Xinicial Yinicial correspondem ao valor da coordenada X e Y da entrada “ID_Peq” N da tabela de atributos;
3. A coluna do Zinicial corresponde ao valor do MDT (Cota) daquele vértice da entrada “ID_Peq” N da tabela de atributos;
4. As colunas do Xfinal e Yfinal correspondem ao valor do Xinicial e Yinicial da entrada “Id_Peq” N+1. Uma vez que o Xfinal e Yfinal de um troço pequeno N é o mesmo que Xinicial e Yfinal do troço pequeno “Id_peq” N+1;
5. O Zfinal à semelhança do ponto acima, foi calculado da mesma forma. O Zfinal do troço pequeno N é o mesmo do Zinicial do troço pequeno “Id_peq” N+1;
6. Uma vez calculada a cota inicial e final foi possível calcular o declive entre o Zinicial e Zfinal e Zfinal e Zinicial. O valor de declive inicio-fim (DecliveIF) é calculado pela expressão E(1), na qual o decliveIF é o declive a calcular em percentagem, Zinicial é a altura do ponto inicial e Zfinal é a altura do ponto final, 5 é a distância entre dois pontos. O valor de declive fim-inicio é o inverso do calculado com a expressão E(1), ou seja se um declive numa direção é por exemplo de 10% na direção oposta será de -10%.

$$DecliveIF = \left[\frac{(Zinicial - Zfinal)}{(\sqrt{5^2 + (Zinicial - Zfinal)^2})} * \right] 100 * (-1) \quad E(1)$$

7. O Rumo foi calculado de forma automática ao executar a ferramenta “*Extract specific vertices*” no *software QGIS*. Este foi associado ao rumo inicio-fim (RumoIF) e o seu inverso, rumo na direção contrária foi atribuído ao campo ao campo “RumoFI”.

Uma vez calculados todos estes parâmetros, foi efetuada uma operação de *join* entre a tabela de atributos *shapefile* de pontos e a tabela de atributos da *shapefile* original de linhas utilizando como chave a coluna “ID_Peq” de forma a transferir informação para a *shapefile* com os troços de 5m. A tabela de atributos final pode ser observada na figura 12.

ID_TroçoG	Shape_Leng	ID_Peq	BEARING	Xini	Xfin	Zini	Yini	Yfin	Zfin	RumoIF	RumoFI	DeclIF	DeclFI	NoInicial	NoFinal	IF	FI
1	251.558306	1	154.423034	-89383.77	-89381.64	87.3559	-100363.954	-100368.403	87.1704	154.423	334.423	-3.7074	3.7074	60	58	60_58	58_60
1	251.558306	2	154.422553	-89381.64	-89379.51	87.1704	-100368.403	-100372.852	87.0445	154.423	334.423	-2.5172	2.5172	60	58	60_58	58_60
1	251.558306	3	154.423002	-89379.51	-89377.381	87.0445	-100372.852	-100377.301	86.925	154.423	334.423	-2.3893	2.3893	60	58	60_58	58_60
1	251.558306	4	154.422566	-89377.381	-89375.251	86.925	-100377.301	-100381.751	86.7509	154.423	334.423	-3.4799	3.4799	60	58	60_58	58_60
1	251.558306	5	154.423007	-89375.251	-89373.122	86.7509	-100381.751	-100386.2	86.5036	154.423	334.423	-4.77665	4.77665	60	58	60_58	58_60
1	251.558306	6	154.42258	-89373.122	-89370.992	86.5036	-100386.2	-100390.649	86.1799	154.423	334.423	-5.334208	5.334208	60	58	60_58	58_60
1	251.558306	7	154.422993	-89370.992	-89368.863	86.1799	-100390.649	-100395.098	85.8324	154.423	334.423	-6.205576	6.205576	60	58	60_58	58_60

Figura 12 - Tabela de atributos para cada troço pequeno com todos os parâmetros calculados

3.2.3 – Correção automática de declives

Após o cálculo dos declives na forma descrita em 3.2.2, detetam-se algumas inconsistências nos valores dos mesmos devido a erros presentes no modelo digital de terreno (*outliers*). Este MDT foi gerado a partir do modelo digital de superfície obtido por *LiDAR*. Apesar do MDT ter sido filtrado ocorrem localmente algumas inconsistências que precisam de ser corrigidas, tais como pontos dos vértices do troço de 5m ficarem em cima de um painel vertical de informações da via ou do separador central ou ainda de uma árvore ou arbusto. Outra causa para erros no cálculo do declive advém da forma como o atributo Zfinal foi calculado. No capítulo 3.2.2 é possível observar que o valor do Zfinal é o valor do Zinicial da próxima entrada na tabela de atributos, se o valor do Zinicial da entrada N+1 da tabela de atributos corresponder ao próximo troço grande, a distância entre os dois pontos já será diferente de 5m o que implica um cálculo de declive errado. Na figura 13 pode observar-se um exemplo da situação descrita, onde estão selecionados dois troços pequenos consecutivos, N e N+1 mas que pertencem a troços grandes diferentes.

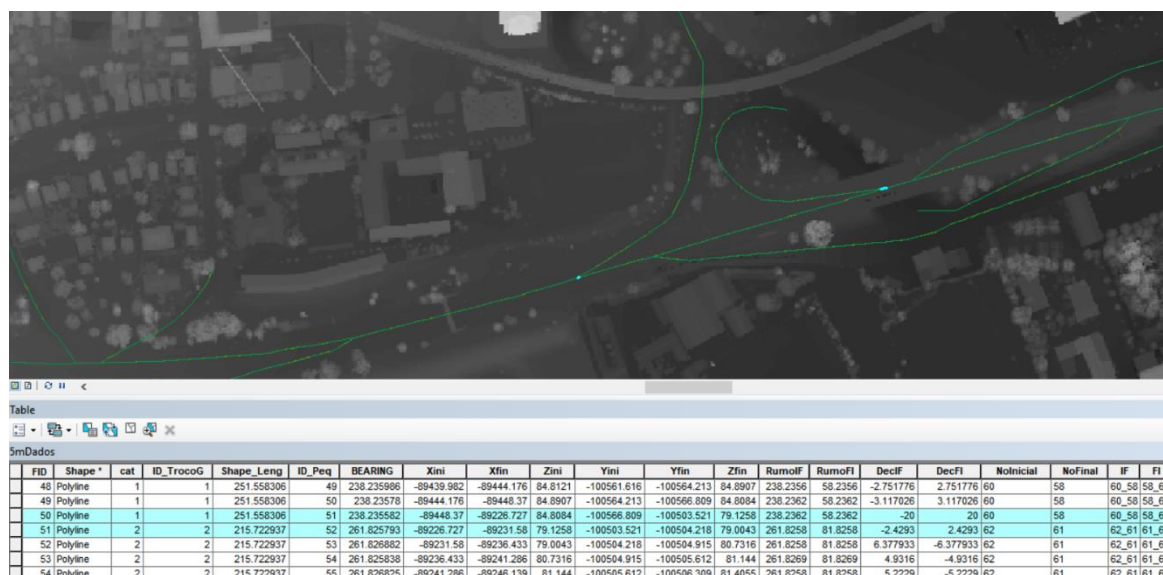


Figura 13 - Erro no declive quando há mudança de troço grande

A solução encontrada para este problema foi de corrigir essa entrada para um valor fixo. Para o efeito elaborou-se um *script* para automatizar o processo, e embora o problema da mudança de troço grande persistisse, o valor de declive nesses casos passou para 20 ou -20%. No caso dos erros devidos a *outliers* no MDT este *script* foi capaz de os suavizar. O fluxograma do *script* produzido encontra-se na figura 14.

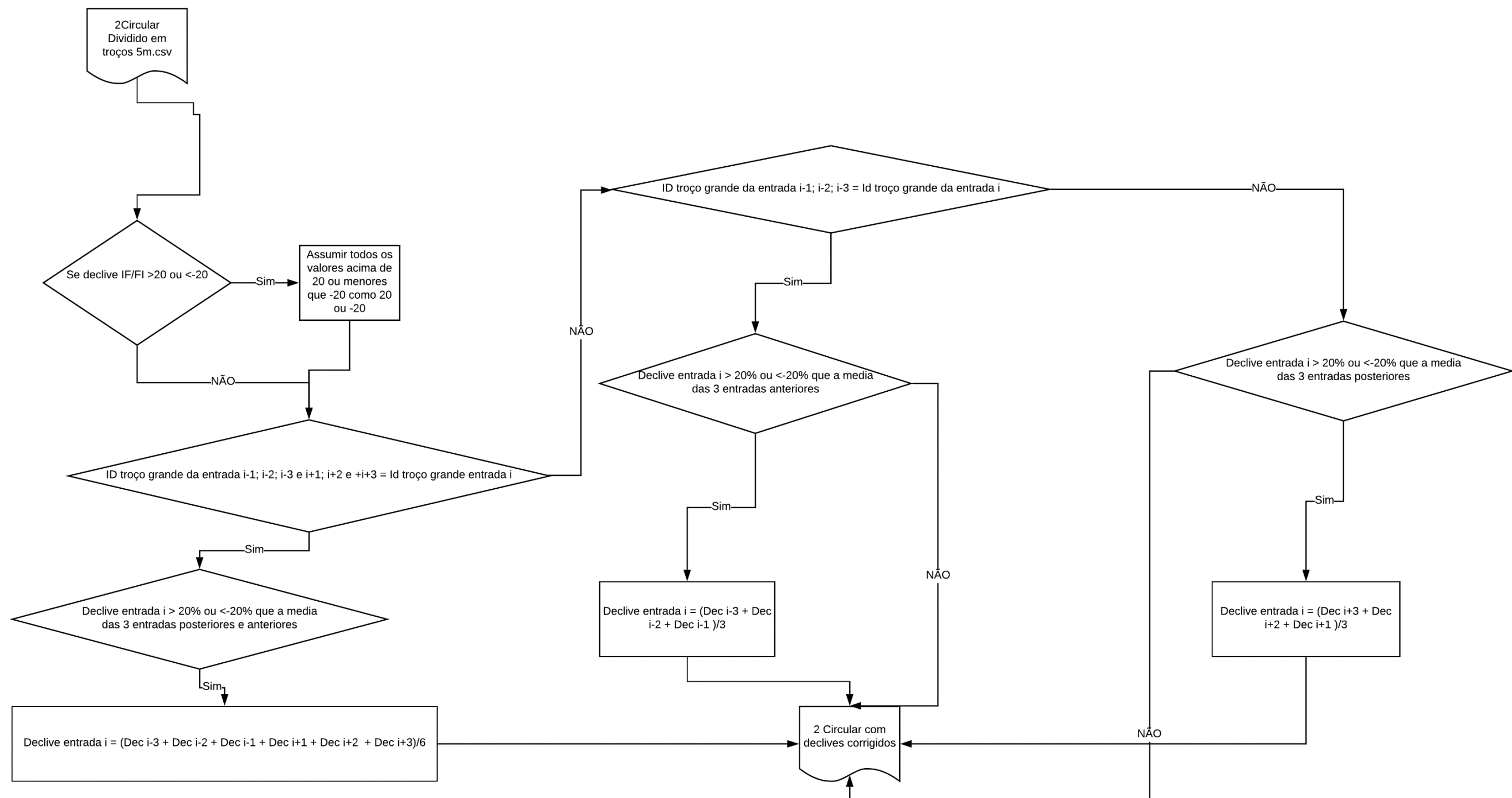


Figura 14 - Fluxograma do script *python* produzido para correção de outliers nos valores dos declives dos troços pequenos.

Finalizada esta operação realizou-se uma importação do ficheiro do tipo .csv (comma delimited) resultante e efetuou-se uma operação de *join* com a *shapefile* dos troços de 5m de forma a obter a *shapefile* com os declives corrigidos.

3.3 – Preparação dos dados para cálculo do encandeamento solar

Nesta fase de trabalho foi necessário converter a informação do formato vetorial para o formato *raster* utilizado no algoritmo GLARE2019. A informação a converter corresponde ao declive na direção início-fim (DecliveIF) e fim-início (DecliveFI), rumo na direção início-fim (RumoIF) e fim-início (RumoFI) e um mapa com valores altimétricos obtidos por *LiDAR* em torno do eixo da via para a altura de um veículo ligeiro, e um mapa com valores altimétricos obtidos por *LiDAR* em torno do eixo da via para a altura de um veículo pesado. Foi também necessária a utilização de uma faixa em torno da via, *buffer*, de 65m do MDS. Este *buffer* de 65m em torno da via é responsável depois no algoritmo GLARE2019 para determinar se existe a presença de sombras / obstáculos aos raios solares.

Na figura 15 e 16 pode ser observado um exemplo onde é convertida a mesma informação do rumo início-fim em formato vetorial para formato *raster*.

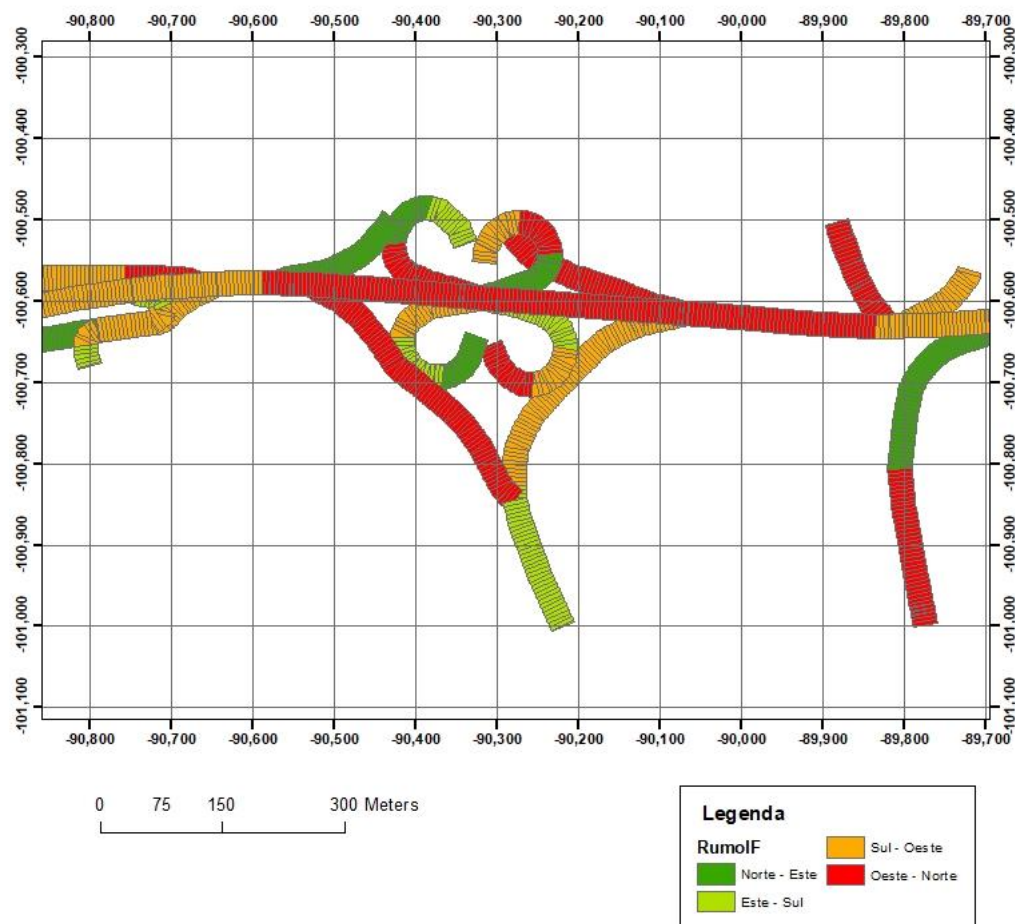


Figura 15 - Buffer de 15m dos troços pequenos de 5m. Exemplo do rumo início-fim

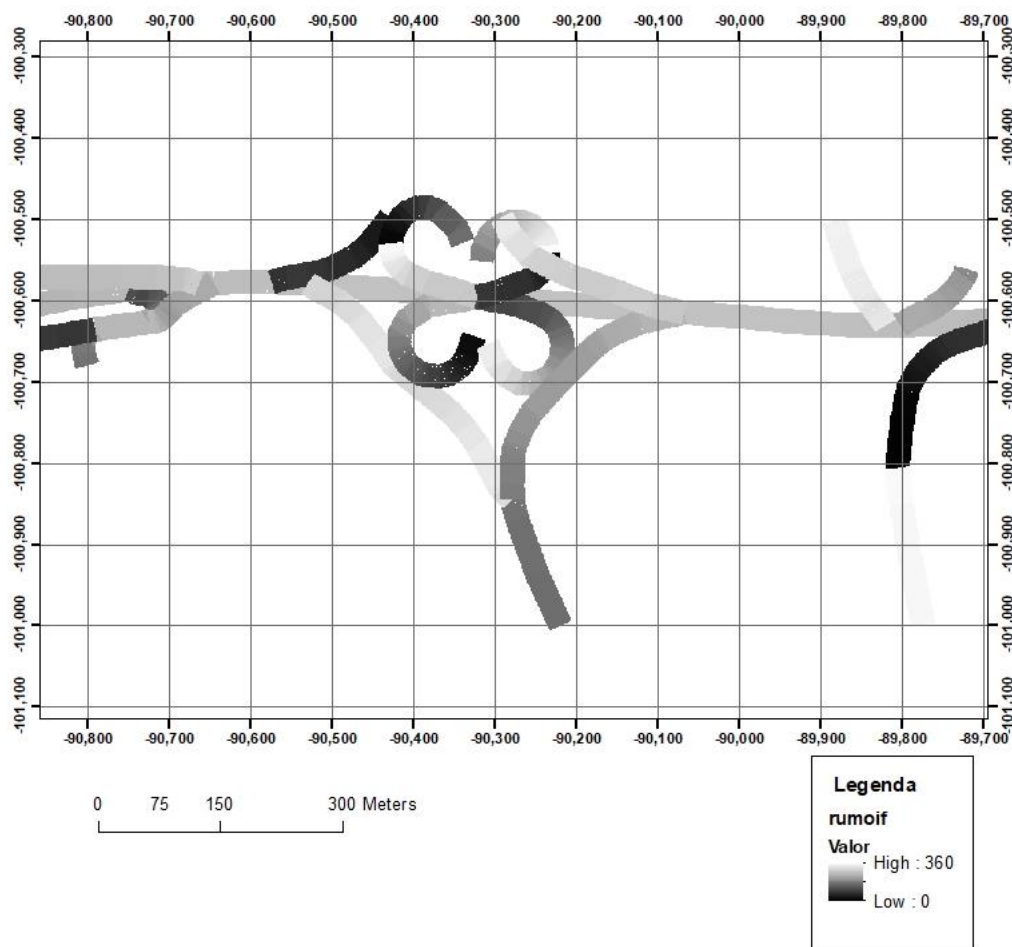


Figura 16 - Rumo início-fim em formato raster.

Assim e de forma a produzir de forma sistemática e organizada a informação necessária para o algoritmo GLARE2019 descrita no parágrafo acima, foram construídos dois modelos automáticos, PREPDADOS_IF e PREPDADOS_FI. Estes modelos são idênticos apenas diferem no conjunto de atributos usados relativos ao sentido de circulação em cada trecho. Um produz para a direção início-fim e o outro para o fim-início. O *workflow* resumido do modelo encontra-se na figura 17.

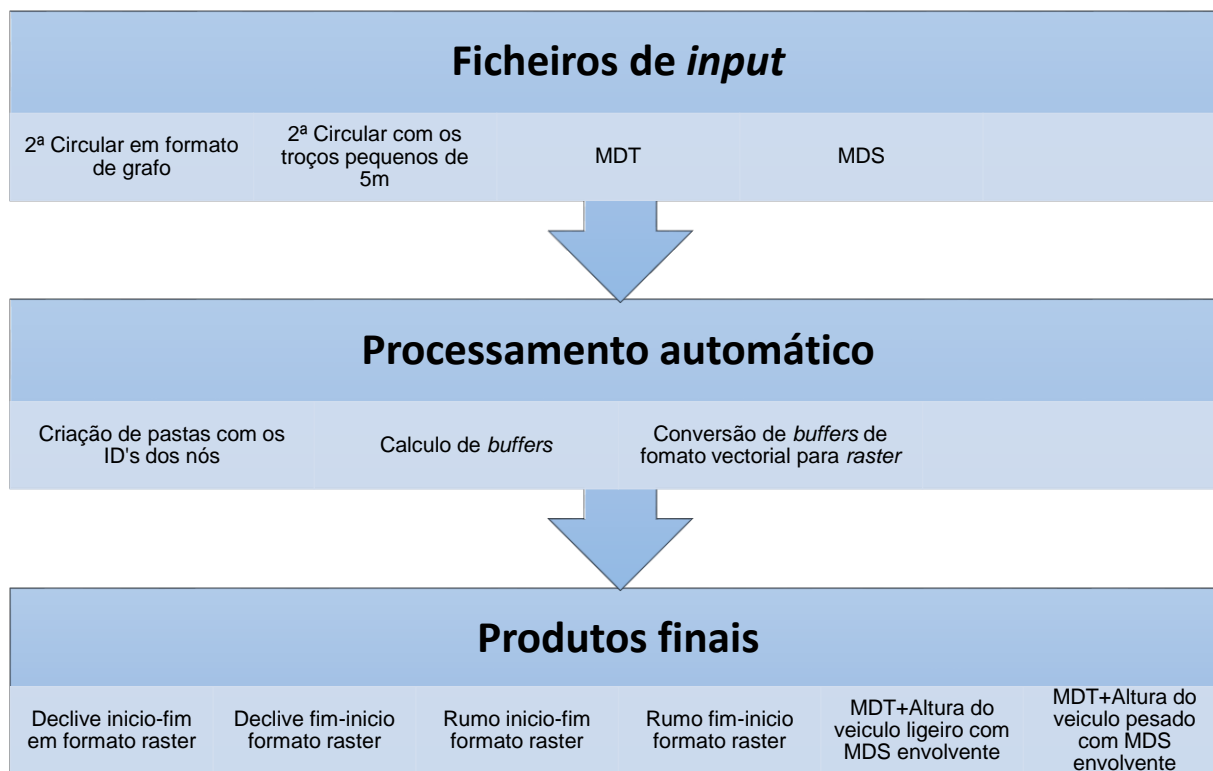


Figura 17 - Resumo do *workflow* do modelo criado

Neste processamento foram executadas 34 operações intermédias que resultaram na criação de 72 pastas, uma pasta para cada troço grande da 2ª Circular cujo nome são os nós que pertencem a esse troço. Em cada pasta foram criados 4 ficheiros em formato ascii (.txt) que correspondem à descrição dos ficheiros *raster* produzidos para cada troço grande da 2ª Circular. No caso do modelo criado para a direção inicio-fim, PREPDADOSIF, foram criados os ficheiros de rumo inicio-fim, declive inicio-fim, junção do MDT+altura do veículo ligeiro com envolvente do MDS e do MDT+altura do veículo pesado com a envolvente do MDS. O modelo PREPDADOSFI tal como já referido, calcula os mesmos resultados mas na direção contrária, fim-inicio. Na figura 18 encontra-se o modelo PREPDADOSIF desenvolvido. Nos próximos subcapítulos serão abordadas as funcionalidades de cada parte do modelo produzido.

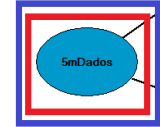


Figura 18 - Modelo automático, PREPDADOSIF desenvolvido no *model builder* do software ArcMap.

3.3.1 – Criação de pastas com os ID dos nós dos troços

Este passo é a base de todo o modelo criado pois é ele que permite a organização da informação por pastas. É também o motor do modelo na medida em que estabelece uma iteração de atributos na tabela de atributos. Esta parte do modelo pode ser observada na figura 19.

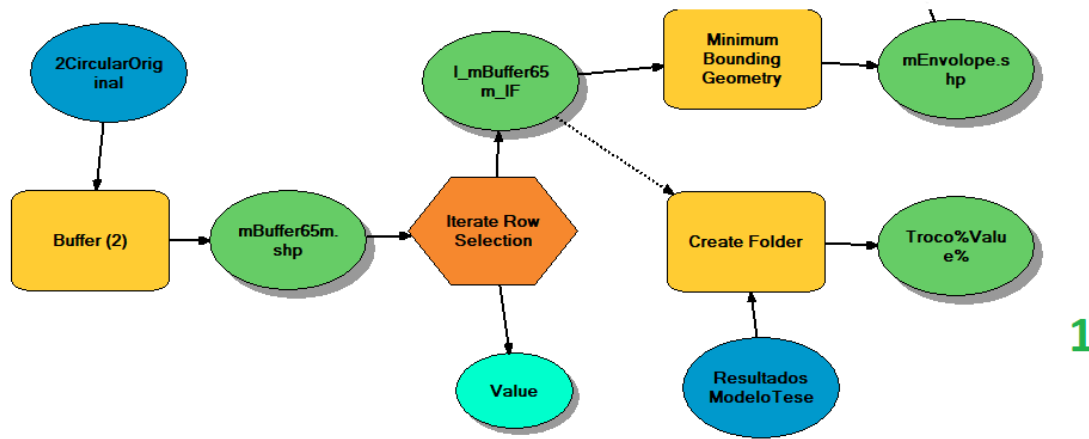


Figura 19 - Parte do modelo responsável pela criação de pastas e *bounding boxes*

Como é possível observar, o modelo começa por criar um *buffer* da *shapefile* da 2ª Circular com os troços grandes não divididos. Este é um *buffer* planar de 65m com uma agregação espacial na coluna IF de forma obter *buffers* de 65m de cada troço grande. Seguidamente este passa para o iterador, o qual vai seleccionar uma a uma as entradas da tabela de atributos guardando o valor de cada IF numa variável, “value”. Seguidamente, é realizada a operação de criação de pasta, que necessita obrigatoriamente que a operação de iteração seja realizada anteriormente. Daí a necessidade de ligar a seleção de cada *bounding box* à operação de *create folder* como pré-condição.

Por último são também criadas as *bounding boxes* de cada *buffer* de 65m, que definem a área correspondente à área de cada ficheiro *raster* com informação necessária para ser usada pelo algoritmo GLARE2019 (c.f. item 3.3.2). Um exemplo do que é uma *bounding box* pode ser observado na figura 20.

Nesta figura, é possível observar o *buffer* de 65m do troço 9 a verde. A *bounding box* ou envelope corresponde aos limites que este *buffer* ocupa.

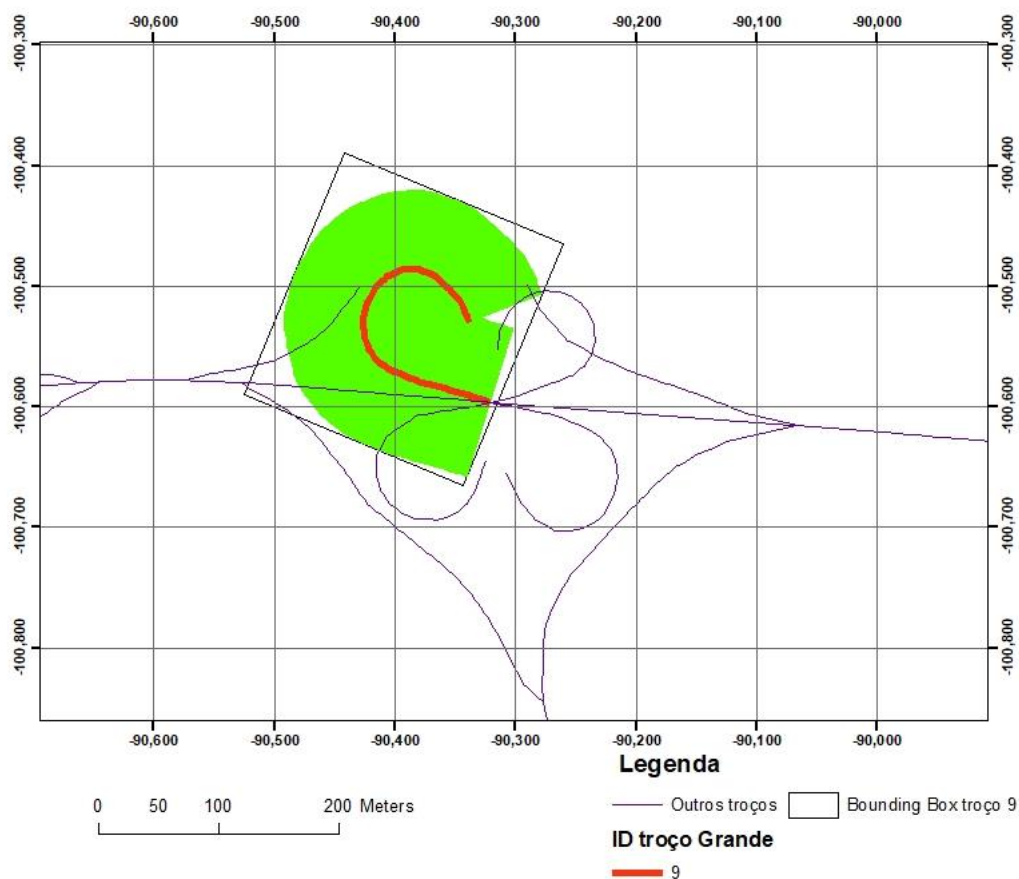


Figura 20 - Exemplo de uma *bounding box*

3.3.2 – Produção dos *rasters* de declive e rumo

Esta fase do modelo é a responsável por criar e converter os valores de declive e rumo de formato vetorial para formato *raster* de cada troço grande. Isto foi alcançado utilizando as ferramentas presentes na figura 21.

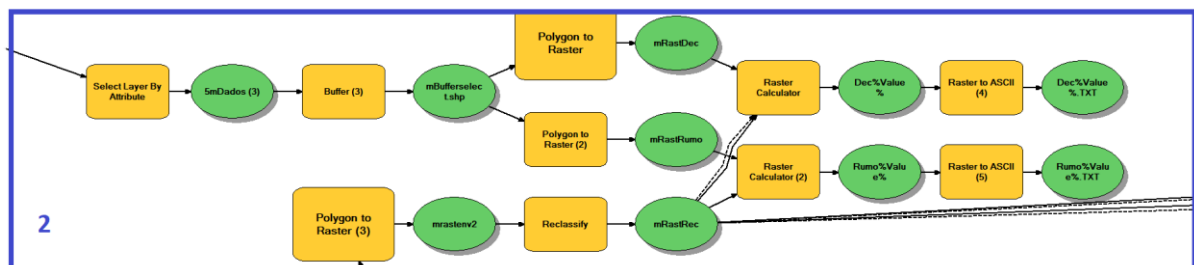


Figura 21 - Parte do modelo responsável pela produção dos ficheiros finais do declive e rumo

Nesta parte do modelo entram como dados de *input* a *shapefile* com os troços de 5m (caixa vermelha e azul da figura 18) com a tabela de atributos já com todos os parâmetros calculados. É efetuada uma seleção através da ferramenta “*Select layer by attribute*” utilizando como variável de seleção a variável

Seguidamente é realizado um *buffer* de 15m da seleção e convertido o mesmo em *raster*. Nessa conversão foi utilizado o *field value* correspondente ao Declive início-fim para um *raster* e o Rumo início-fim para outro *raster*. Estes *rasters* produzidos foram ainda multiplicados pelo *raster* da *bounding box*, preenchida com valores de 1 criada no passo anterior, de forma a garantir que todos os *rasters* produzidos têm a mesma *bounding box*. Seguidamente foram convertidos para ASCII em que se colocou como destino a pasta criada no passo anterior com o nome correspondente ao ID do troço (a variável de interação).

Finalmente nesta fase foram criados os dois últimos ficheiros de *output* do modelo. Estes correspondem à *bounding box* de cada troço grande. O procedimento encontra-se na figura 22.



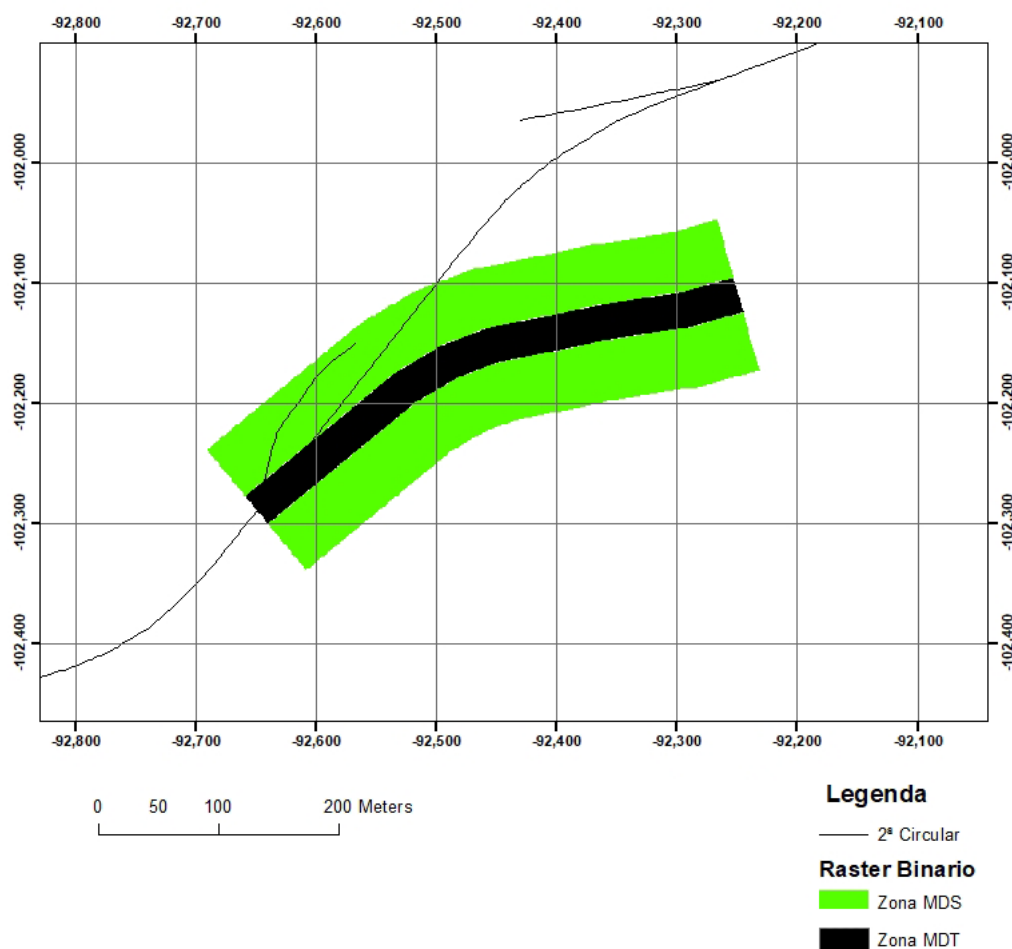


Figura 23 - Exemplo de um raster binário

O *buffer* de 15m foi também convertido para um *raster* e seguidamente reclassificado para que o que estivesse na zona do *buffer* fosse classificado como 1 e o que estivesse fora fosse classificado como 0. Isto permitiu que ao multiplicar esse *raster* reclassificado pelo MDT se obtivesse a faixa do MDT correspondente ao *buffer* dos 15m.

Na figura 22 é possível observar a utilização do *Raster Calculator* (4) e (5), estes foram empregues para adicionar ao MDT a altura média dos olhos do condutor dos veículos: 1,03m para o caso dos veículos ligeiros e 2,33m para o caso dos veículos pesados.

Os *rasters* resultantes desta operação foram sujeitos a uma operação condicional com o *raster* binário previamente produzido, de forma a poder obter um *raster* único com a faixa de 15m com a altura do terreno + altura dos veículos ligeiros / pesados e a zona que fica além da faixa de 15m, que corresponde ao MDS.

Por último foram convertidos em formato ASCII e guardados no sistema de pastas descrito no capítulo 3.3.1.

Na figura 24, 25 e 26 estão alguns exemplos de resultados do modelo.

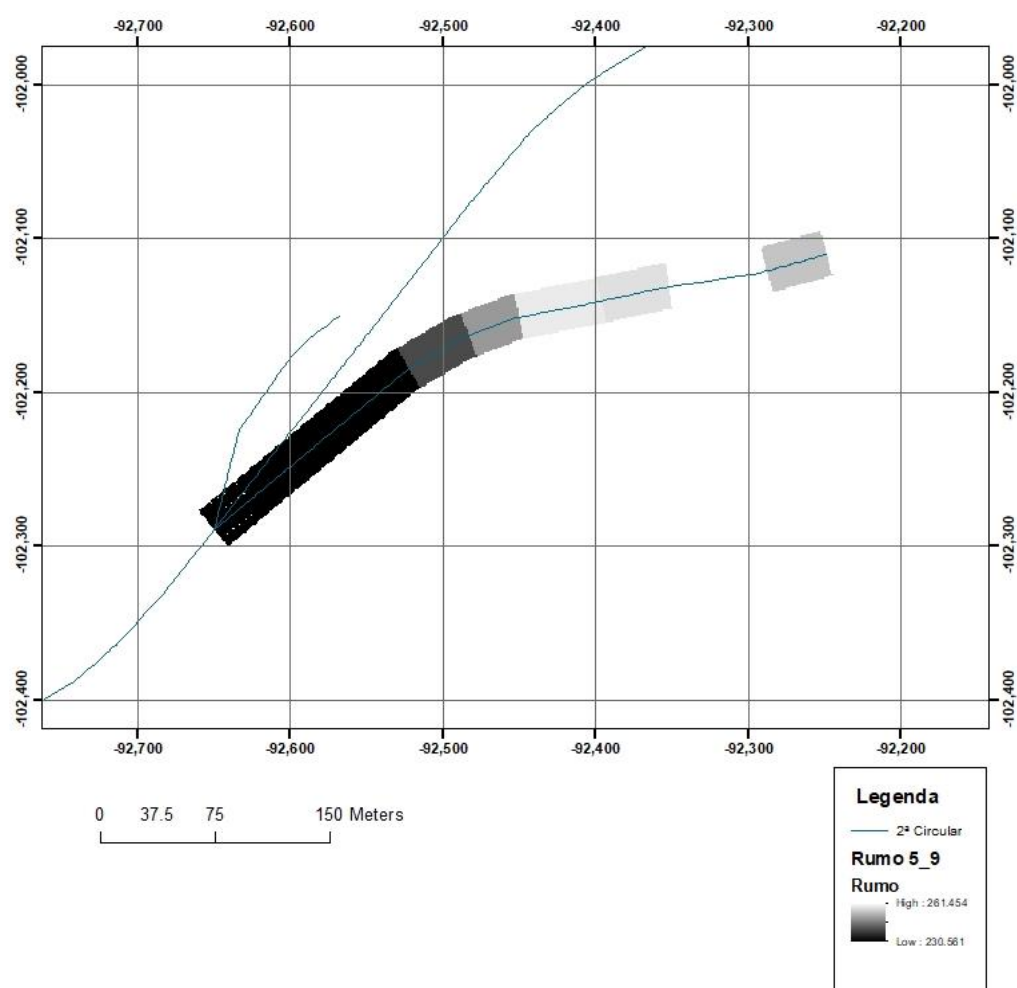


Figura 24 – Resultado do cálculo do rumo do modelo apresentado

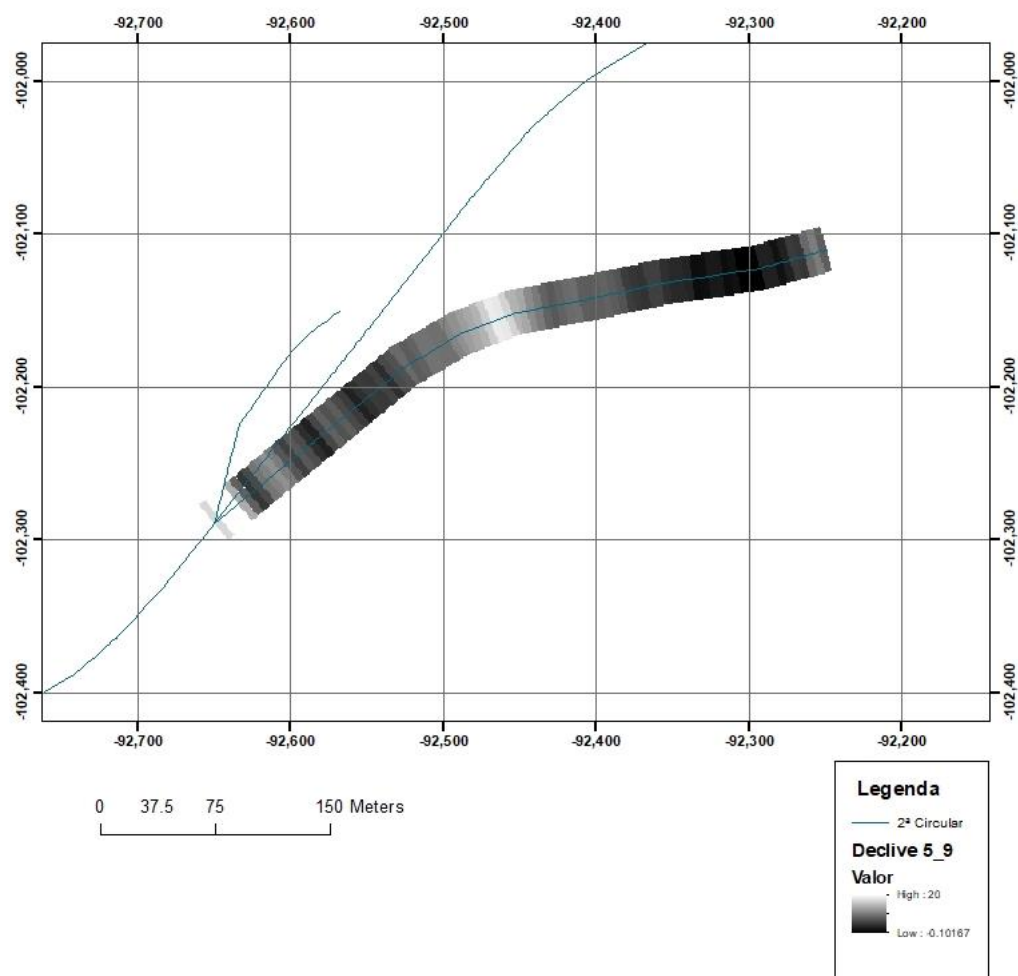


Figura 25 - Resultado do cálculo do declive do modelo apresentado

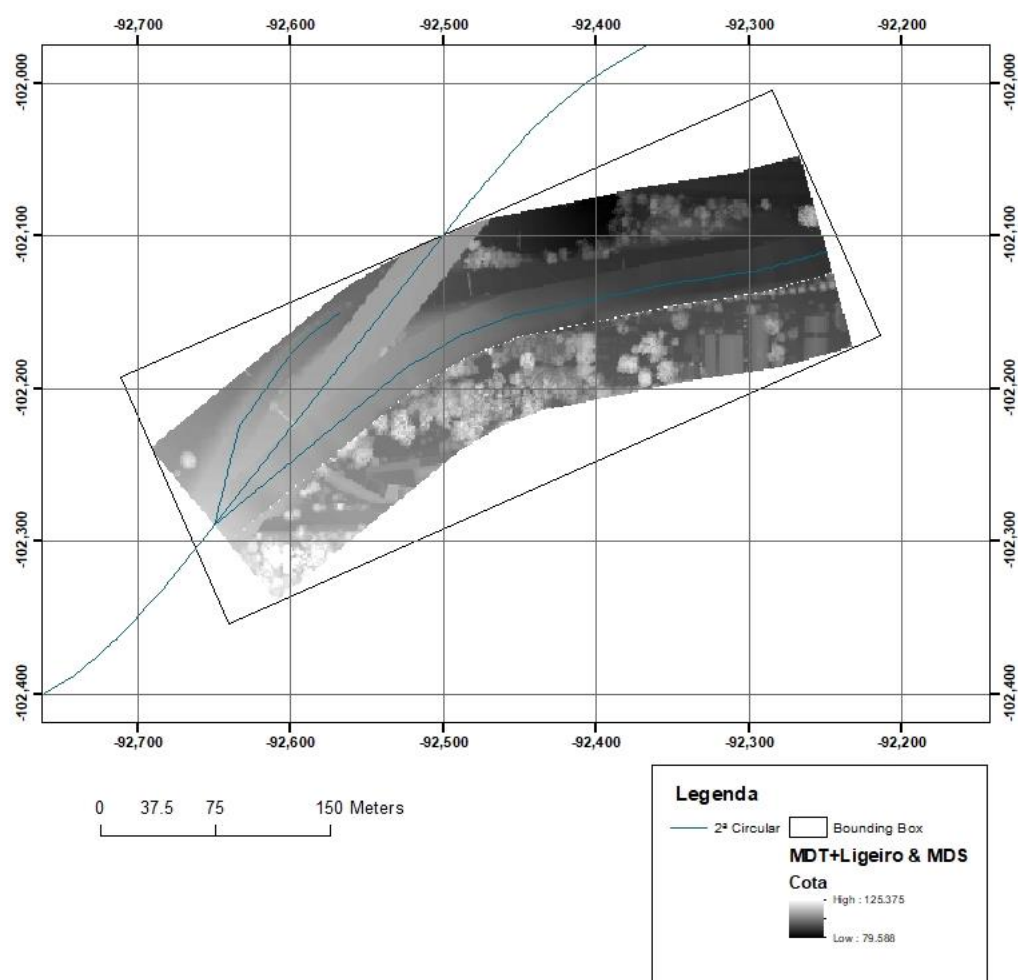


Figura 26 - Calculo da junção da faixa de 15m do MDT+altura do veículo ligeiro e envolvente MDS

3.4 Cálculo da suscetibilidade da 2ª Circular a encandeamento solar e discussão de resultados

Uma vez finalizado o processo de preparação dos dados, estes foram usados no algoritmo GLARE2019. Este algoritmo gera, para cada troço grande, uma matriz temporal binária com 365 colunas e 24 linhas de cada troço grande, onde “1” corresponde a presença de encandeamento solar no troço grande e “0” corresponde à ausência de encandeamento nesse troço grande. Nesta matriz cada coluna representa um dia do ano e cada linha a hora do dia, uma vez que este foi o intervalo definido para a verificação de condições encandeantes. As 24 linhas indicam que o intervalo temporal utilizado no cálculo foi de 1h. Ao somar as linhas da matriz temporal é possível calcular, para uma determinada hora do dia, a quantidade de vezes que um troço foi encandeado ao longo de um ano.

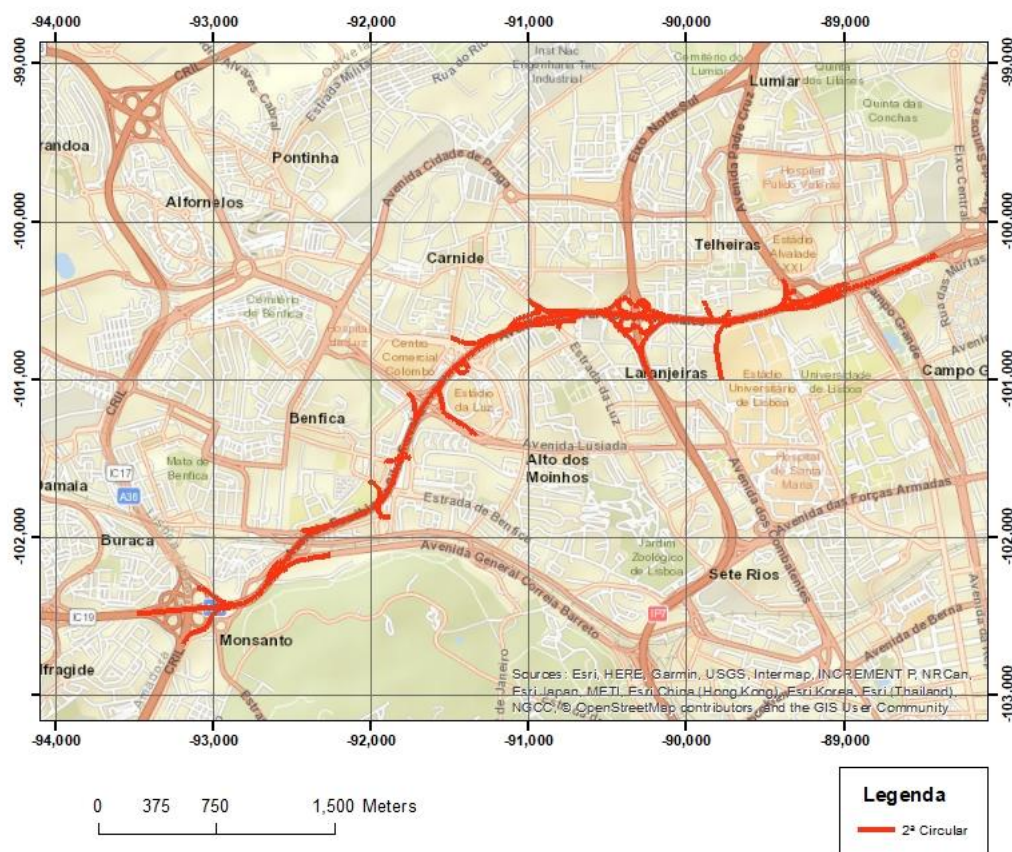
O GLARE2019 gera ainda mapas binários com a extensão de cada troço grande em que cada valor “1” representa a presença de encandeamento solar e “0” a ausência de encandeamento, no intervalo de tempo definido, neste caso de 1h. Com estes mapas é possível fazer análises espaciais, de cada troço da 2ª Circular, permitindo observar como se desenvolvem os fenómenos de encandeamento ao longo de um troço.

De forma a calcular a suscetibilidade ao longo de cada troço grande e atribuir uma classificação de suscetibilidade a essa porção do troço grande, procedeu-se a uma operação de soma entre grelhas correspondentes a todos os mapas resultantes do algoritmo GLARE2019 para cada troço grande. A grelha resultante do somatório de todos os mapas de encandeamento foi então posteriormente convertida em formato vetorial, numa *shapefile* de polígonos, e efetuada a interseção espacial com a *shapefile* da rede viária. Com esta operação é originada uma *shapefile* da rede viária com a quantidade de horas que o troço grande, em estudo, esteve sujeito a condições de encandeamento. Por fim, a rede viária resultante foi classificada em cinco classes distintas de suscetibilidade: nula, baixa, moderada, alta e muito alta. Este intervalo de classificação foi definido através da normalização da escala que considera o máximo de vezes que um troço poderia ser encadeado no período das 06:00 às 10:00 e das 17:00 às 21:00. Este intervalo de tempo corresponde também ao período em que se verifica maior encandeamento solar, devido ao nascer do sol ou devido ao por do sol.

No subcapítulo seguinte será analisada grande parte da 2ª Circular com base nos resultados obtidos pelo algoritmo GLARE2019. Serão também apresentados 3 exemplos de troços grandes com diferentes geometrias ao longo do troço. Estes exemplos têm como objetivo, observar com maior resolução como varia o fenómeno de encandeamento solar ao longo de um troço consoante a direção do mesmo.

3.4.1 – Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular e discussão de resultados

A 2ª Circular é uma das vias mais importantes da cidade de Lisboa. Inicia-se no final do IC19 na direção Sintra-Lisboa e tem o seu final na A1 na direção Lisboa-Porto. É composta por três avenidas, Avenida Eusébio da Silva Ferreira, Avenida General Norton de Matos e Avenida Marechal Craveiro Lopes. A 2ª Circular é uma via rápida composta por 3 faixas em cada sentido de circulação. O seu traçado de forma geral é no sentido Este-Oeste / Oeste-Este com exceção junto ao início / final da A1 onde apresenta uma direção de Sul-Norte / Norte-Sul. Na figura 27 encontra-se o traçado da 2ª Circular em estudo neste projeto.



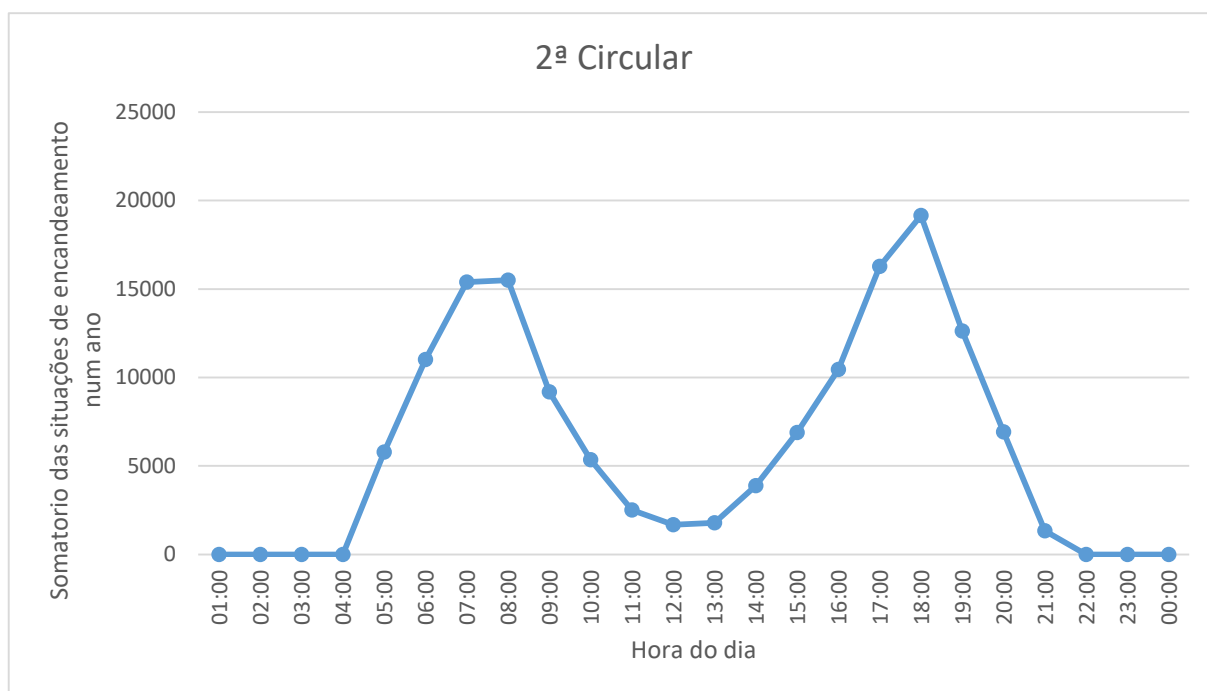


Gráfico 1 - Situações de encandeamento ao longo de um ano na 2ª Circular

No gráfico 1 é possível observar a evolução do fenómeno do encandeamento solar ao longo do dia num ano. Este gráfico foi produzido somando todas as matrizes temporais resultantes do algoritmo GLARE2019 de todos os troços grandes na zona de estudo da 2ª Circular.

Ao longo do dia na 2ª Circular verificam-se dois períodos em que os fenómenos de encandeamento são máximos, no período da manhã às 08:00 com 15500 fenómenos de encandeamento e no final da tarde às 18:00 com 19154 fenómenos de encandeamento solar. Estes dois períodos máximos de número de encandeamentos são produto da orientação geral da 2ª Circular, aproximadamente Este-Oeste / Oeste-Este resultante do nascer do sol e por do sol. O número total de situações de encandeamento num ano em cada hora encontra-se em mais detalhe na tabela 2.

Tabela 2 - Total de situações de encandeamentos num ano por hora do dia na 2ª Circular

Hora do dia	Total de situações de encandeamentos num ano	Hora do dia	Total de situações de encandeamentos num ano
01:00	0	13:00	1774
02:00	0	14:00	3887
03:00	0	15:00	6890
04:00	0	16:00	10448
05:00	5782	17:00	16273
06:00	11012	18:00	19154
07:00	15399	19:00	12623
08:00	15500	20:00	6917
09:00	9180	21:00	1337
10:00	5341	22:00	0
11:00	2503	23:00	0
12:00	1669	00:00	0

A nível espacial, em que o número de encandeamentos num ano é resultado de uma intersecção espacial do somatório de todas as grelhas de encandeamento solar para um troço grande, obteve-se como resultado a figura 28, correspondente à suscetibilidade a encandeamento na 2ª Circular na direção início-fim, e a figura 29, suscetibilidade a encandeamento na 2ª Circular na direção fim-início.

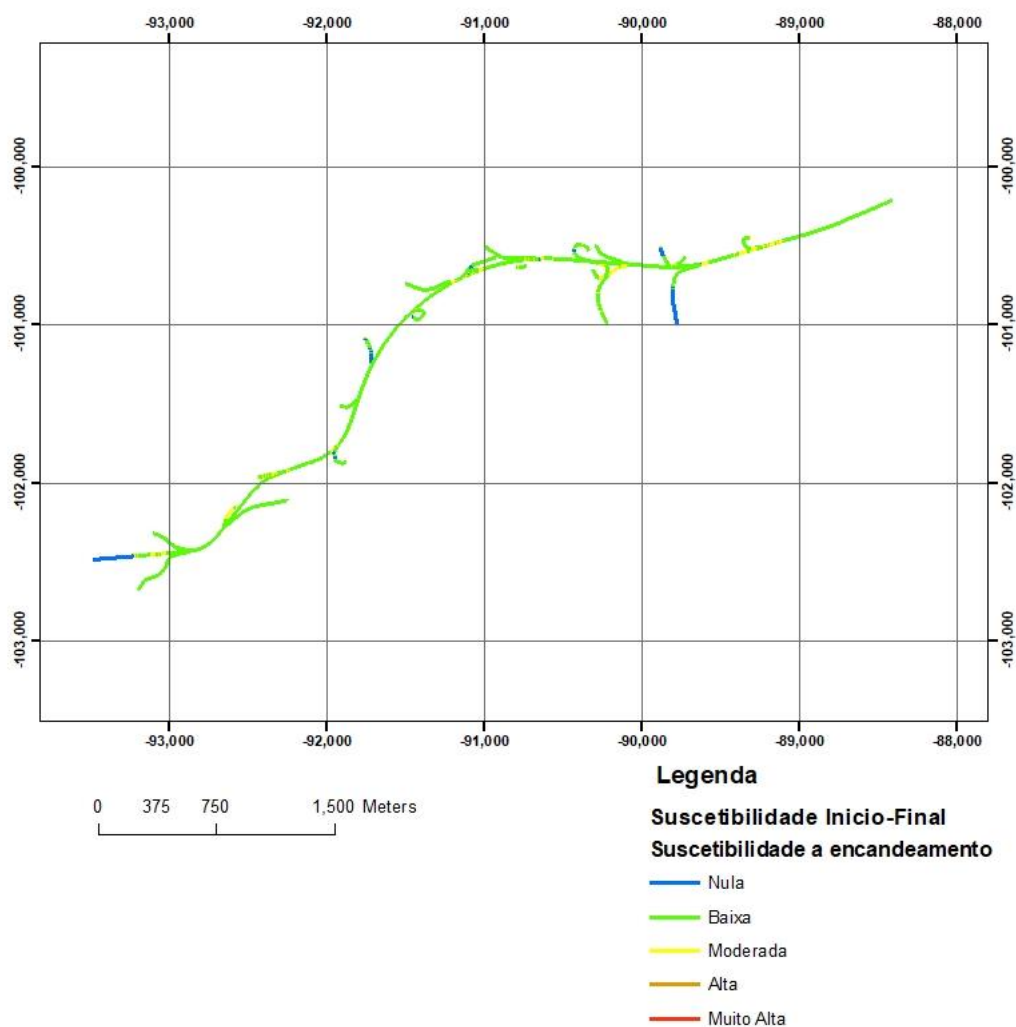


Figura 28 – Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular na direção início-fim

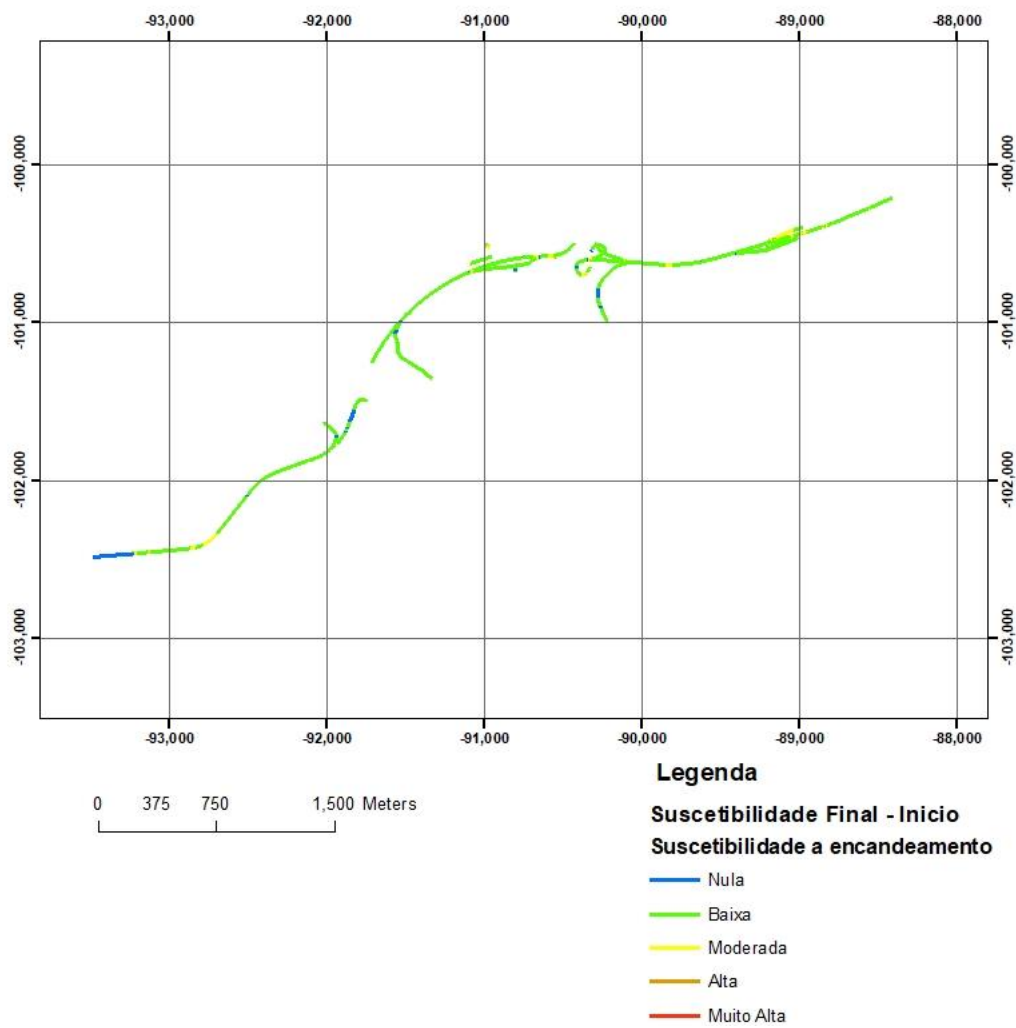


Figura 29 - Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular na direção início-fim

Finalmente, os dois mapas de suscetibilidade a encandeamento solar foram somados de forma a obter a suscetibilidade total a encandeamento solar na 2ª Circular. Este resultado encontra-se na figura 30.

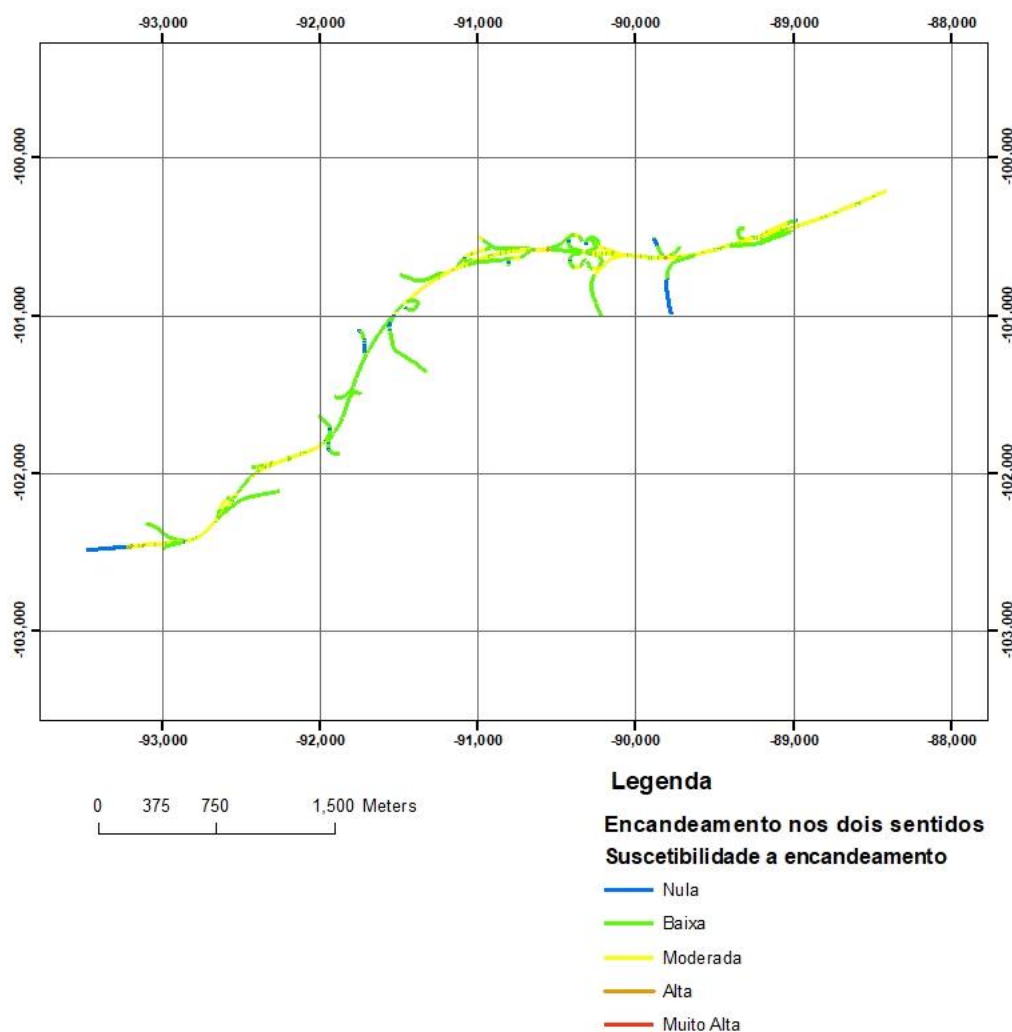


Figura 30 - Suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular

Como é possível observar pela figura 28 e 29, existe uma predominância total da classe de suscetibilidade baixa ao longo da 2ª Circular. Isto deve-se ao facto que apenas foi calculado os valores de encandeamento para uma direção de condução, sendo necessário o mapa complementar, direção de condução oposta, para obter o valor de suscetibilidade total da 2ª Circular.

Na figura 29 existe uma maior diversidade de classes sendo possível observar 4 diferentes classes no mapa: Nula; baixa; moderada e alta. As que mais se destacam são as classes “baixa” e “moderada”. É de notar que a direção do troço quanto mais perto da direção Este-Oeste maior a sua suscetibilidade a encandeamento solar, e que os troços com direção aproximadamente Norte-Sul tem uma suscetibilidade mais baixa ou mesmo nula. A única exceção é no início da 2ª Circular perto do IC19 que tem uma direção Oeste-Este mas que apresenta uma suscetibilidade nula, isto é devido à ausência de dados LiDAR para esta localização como verificado na figura 6 e 7.

Os valores estatísticos, figura 31, para o encandeamento solar na 2ª Circular indicam que no seu traçado em estudo, para os dois sentidos, existe uma média de 869h e 41m de encandeamento solar e a máxima duração de condições encandeantes na 2ª Circular, no período de tempo de um ano, são 2012 horas.

A distribuição de frequências apresentada na figura 31 acontece devido à predisposição de um troço ser encandeado ou não. Existem troços que são apenas encandeados ou no período da manhã ou no período da tarde e outros que são nos dois períodos.

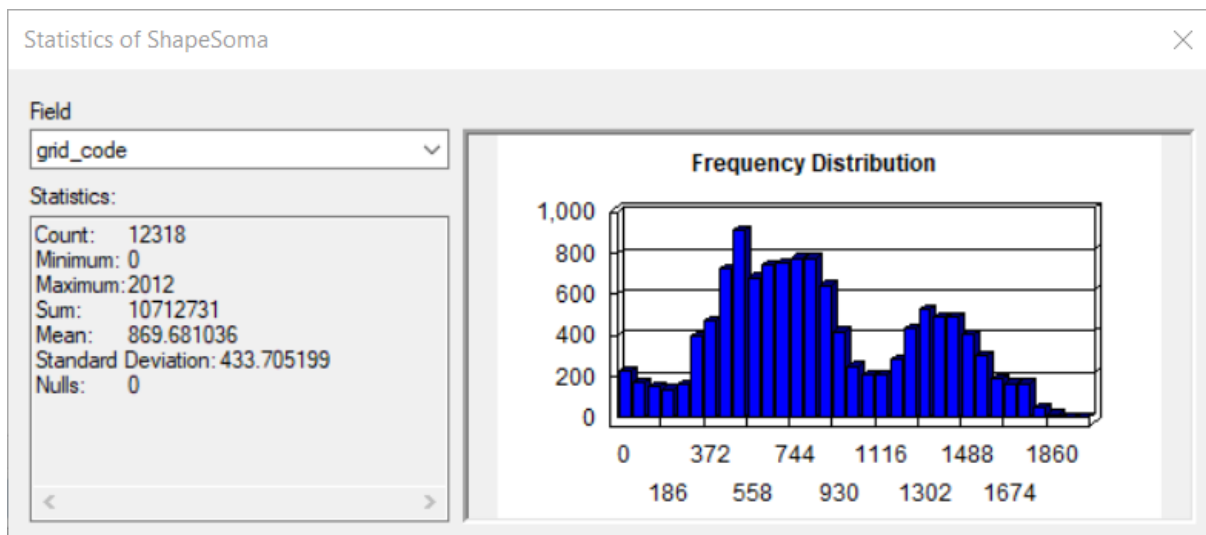


Figura 31 - Valores estatísticos para o encandeamento da 2ª Circular. O grid_code do campo field representa o número de horas de encandeamento solar de cada entrada na tabela de atributos.

Estes resultados podem também ser projetados em 3D no *software Google Earth*, como se exemplifica na figura 32. Nesta projeção, a altura de cada coluna é representativa de 10% das horas de encandeamento ao longo da 2ª Circular. Cada coluna é também o resultado da intersecção espacial entre a vectorização do somatório dos resultados de encandeamento do algoritmo GLARE2019 e a 2ª Circular. O esquema de cores segue os mesmos níveis de suscetibilidade apresentados na figura 28 e 29.

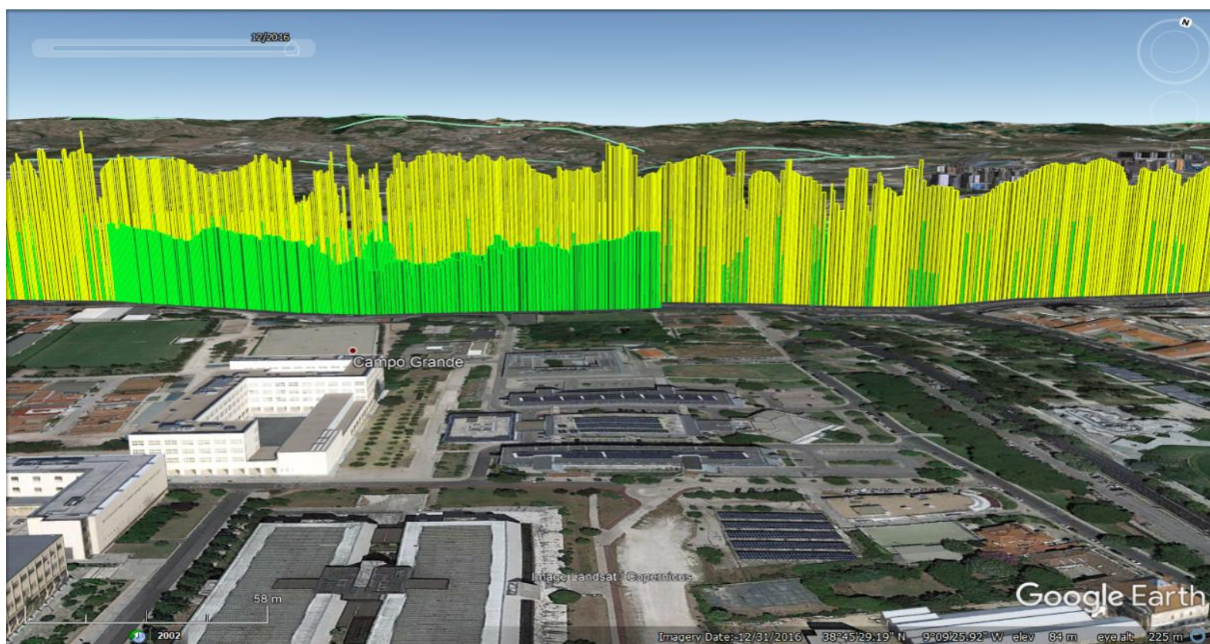


Figura 32 - Representação 3D da suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular.

3.4.2 – Nó do Eixo Norte-Sul

De todos os troços presentes na 2ª Circular, o caso do nó do Eixo Norte-Sul é um dos casos mais interessantes para o estudo da suscetibilidade a encandeamento solar. Neste tipo de troços, o condutor muitas vezes finaliza o percurso a uma cota substancialmente diferente da qual iniciou o percurso. No caso do nó em questão, este faz ligação com o IP7 (Eixo Norte-Sul) que se localiza acima da 2ª Circular. Este tipo de troço é também caracterizado por ser um troço com uma geometria circular, em que o condutor nunca está durante mais que alguns metros a conduzir numa mesma direção. Finalmente, um condutor que entre numa via com esta tipologia normalmente acaba o seu trajeto na direção perpendicular à que começou (figura 33).

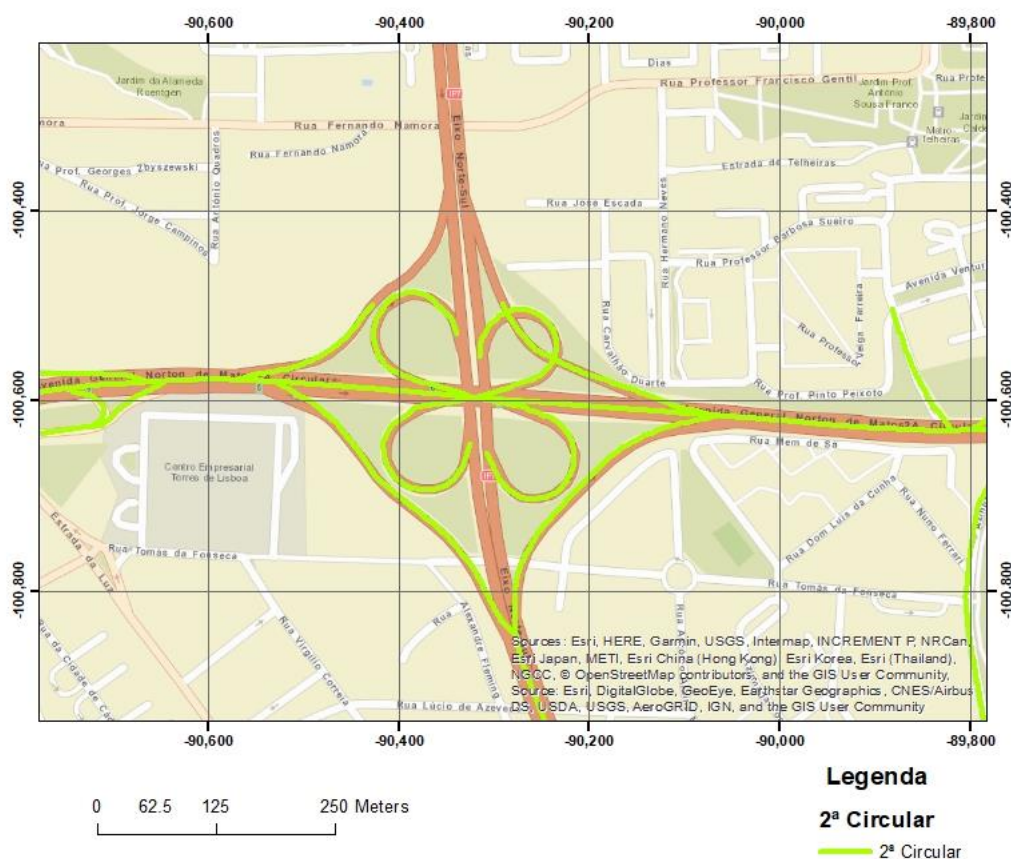


Figura 33 - Nó Eixo Norte-Sul/ 2ª Circular

Neste subcapítulo será analisada a evolução da suscetibilidade a encandeamento solar nos troços que fazem a ligação entre a 2ª Circular e o eixo Norte-Sul (IP7), figura 34.

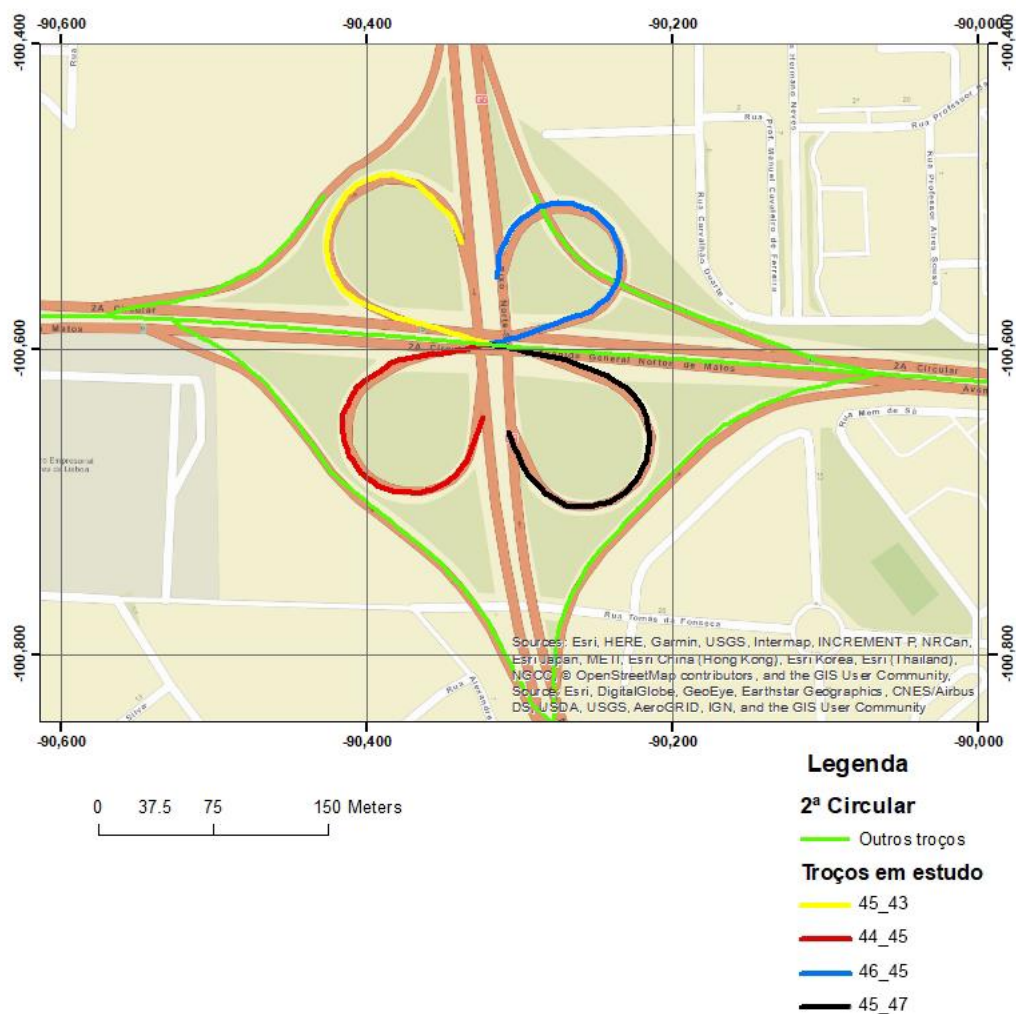


Figura 34 - Troços em estudo do Nó Eixo Norte-Sul/ 2ª Circular

Como é possível verificar pela figura 33, os troços em estudo iniciam-se ou terminam na 2ª Circular. Os troços 45_43 e 45_47 são saídas da 2ª Circular para o eixo Norte-Sul e os troços 44_45 e 46_45 são saídas do eixo Norte-Sul para a 2ª Circular. Por isso, estes troços são apenas circuláveis num sentido.

Os gráficos 2, 3, 4 e 5 ilustram como se desenvolve o encandeamento solar temporalmente ao longo de um ano nestes troços.

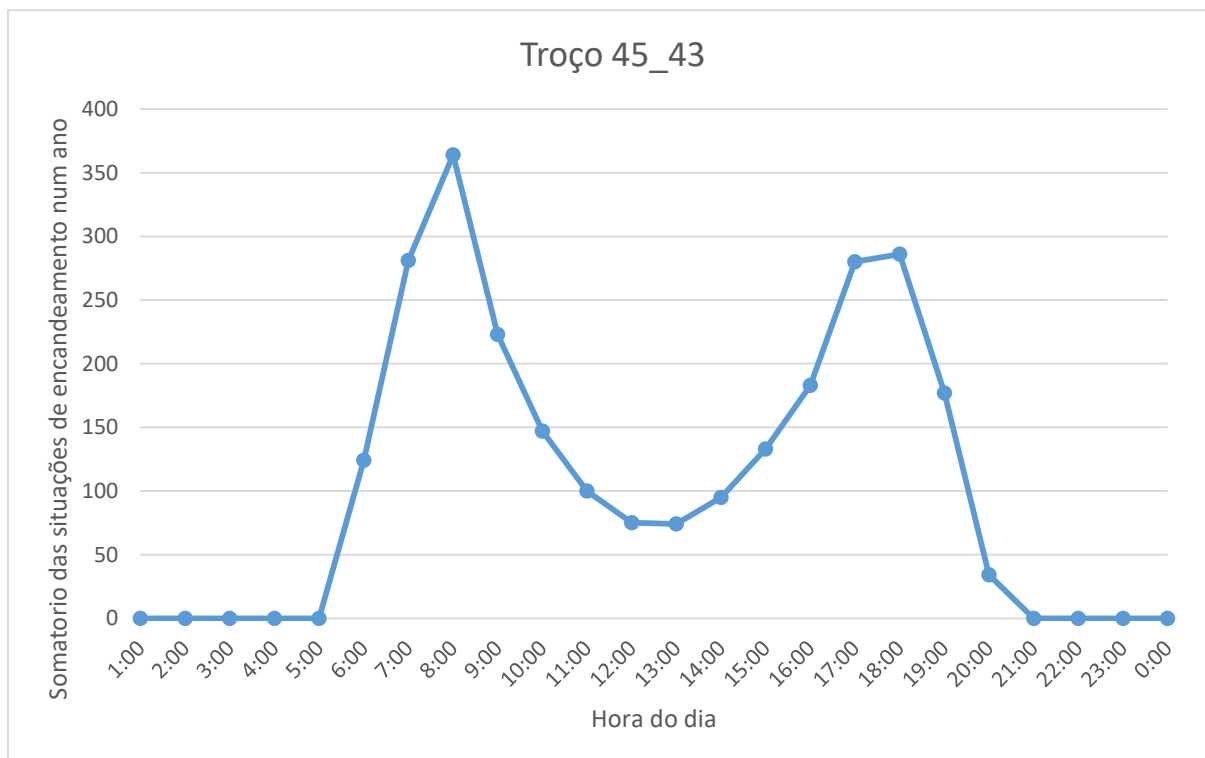


Gráfico 2 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 45_43

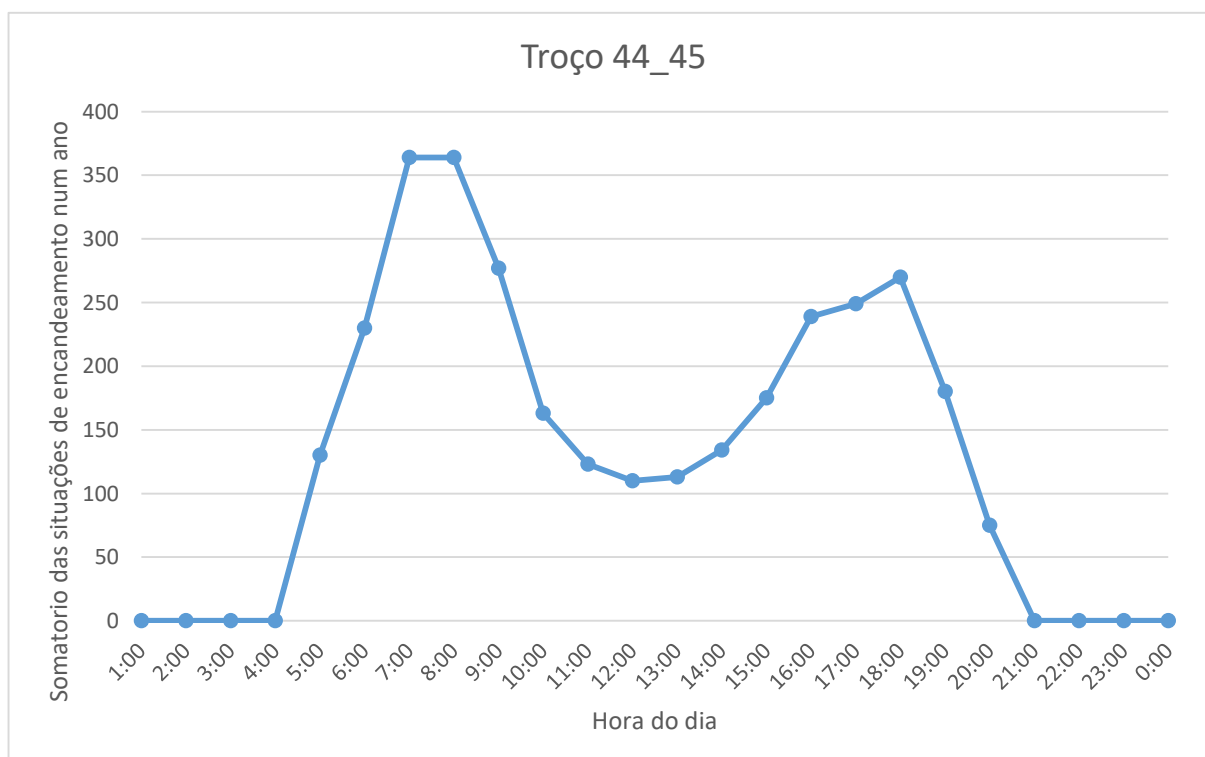


Gráfico 3 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 44_45

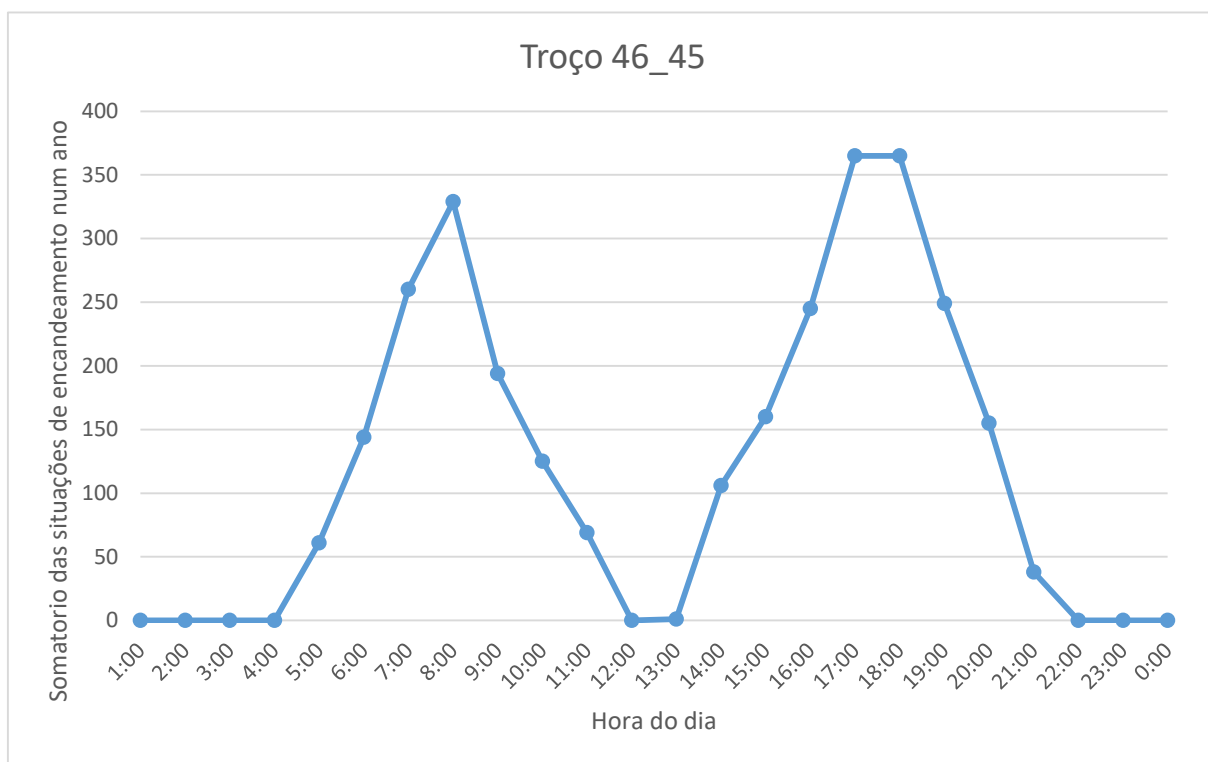


Gráfico 4 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 46_45

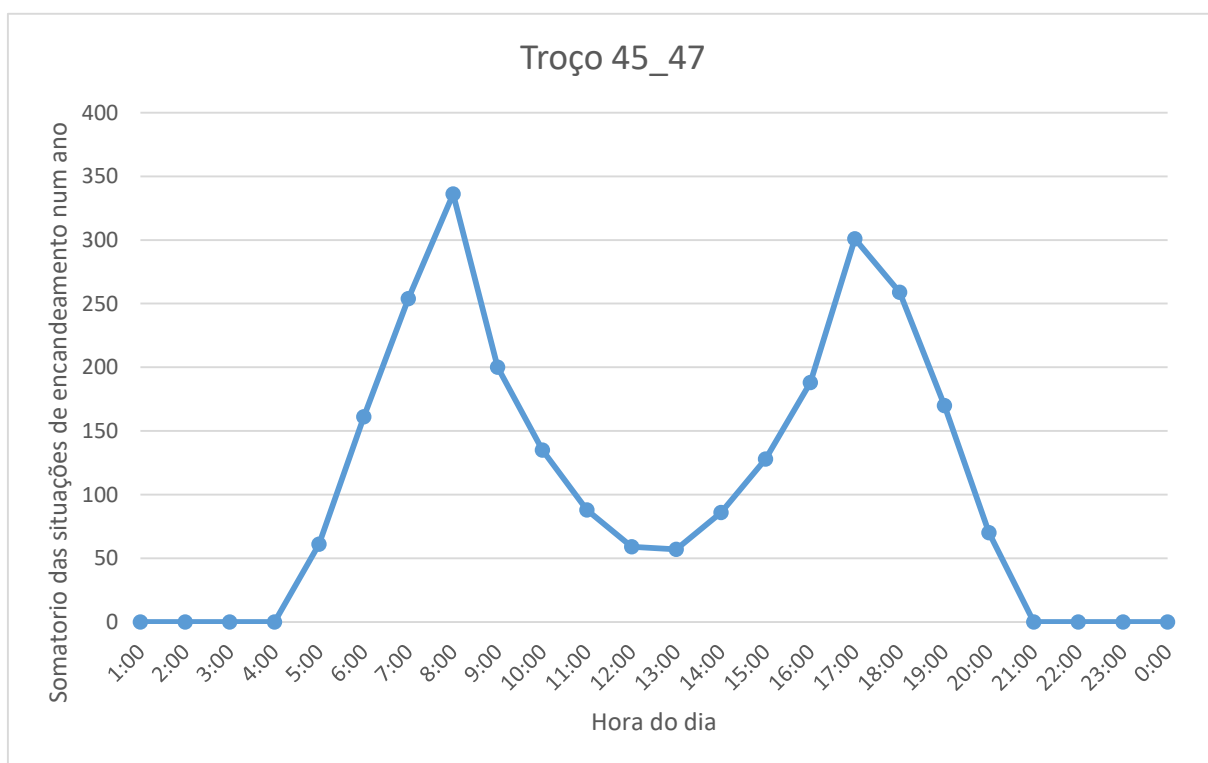


Gráfico 5 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 45_47

Através da análise dos gráficos 2 a 5 é possível verificar que todos os troços têm as mesmas condições de propensão a encandeamento. Estes troços apresentam um pico no período da manhã, e um pico mais pequeno no período do final da tarde. A exceção é o troço 46_45 que apresenta mais fenómenos de encandeamento ao longo no ano no período do final da parte da tarde.

Espacialmente, a suscetibilidade a encandeamento solar encontra-se na figura 35.

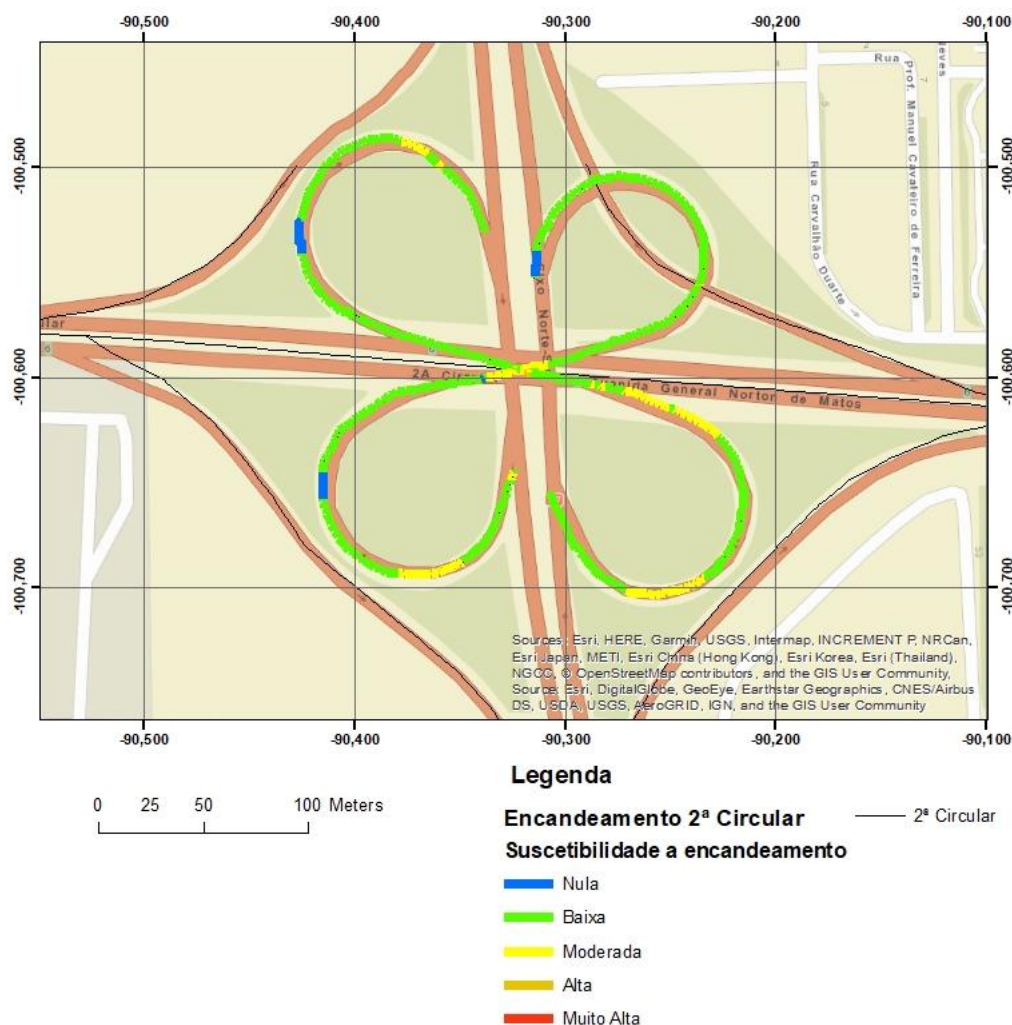


Figura 35 – Suscetibilidade a encandeamento solar no nó Eixo Norte-Sul/ 2ª Circular

Através da figura 35 é possível observar que, a suscetibilidade neste nó é de forma geral baixa com pequenas extensões de troço em que a vulnerabilidade é nula. A exceção é o troço 45_47 que apresenta valores de vulnerabilidade moderada em quase metade do seu percurso. Este troço é também o único dos quatro em análise que não apresenta vulnerabilidade nula ao longo do seu percurso.

Os sectores da via com vulnerabilidade nula são os que se encontram na direção Norte-Sul, o troço 44_45 é um perfeito exemplo disto, uma vez que a secção da via, onde a vulnerabilidade é nula, é perfeitamente paralela à grelha orientada do mapa.

3.4.3 – Troço 55_57: Azinhaga das Galhardas

Este troço é uma rua de sentido único que termina na 2ª Circular. Como verificado na figura 36, é um troço que mais de metade do seu trajeto é efetuado como uma direção Sul-Norte. Este troço como termina na 2ª Circular, tem na sua parte final uma direção Oeste-Este.

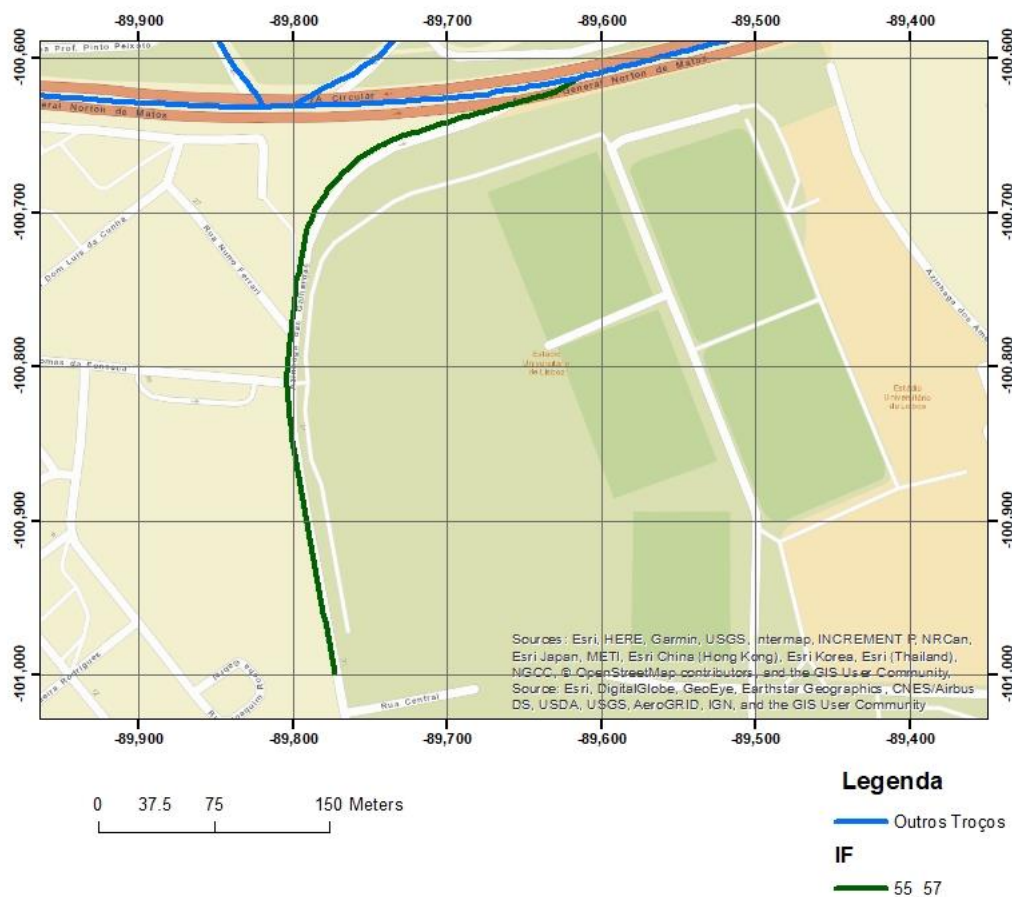


Figura 36 - Troço 55_57: Azinhaga das Galhardas

Face a esta geometria é de expectar que este troço exiba uma suscetibilidade baixa na sua metade mais a sul e uma suscetibilidade maior na sua parte mais a norte. Através do mapa de suscetibilidade da 2ª Circular, figura 37, é possível comprovar esta hipótese.

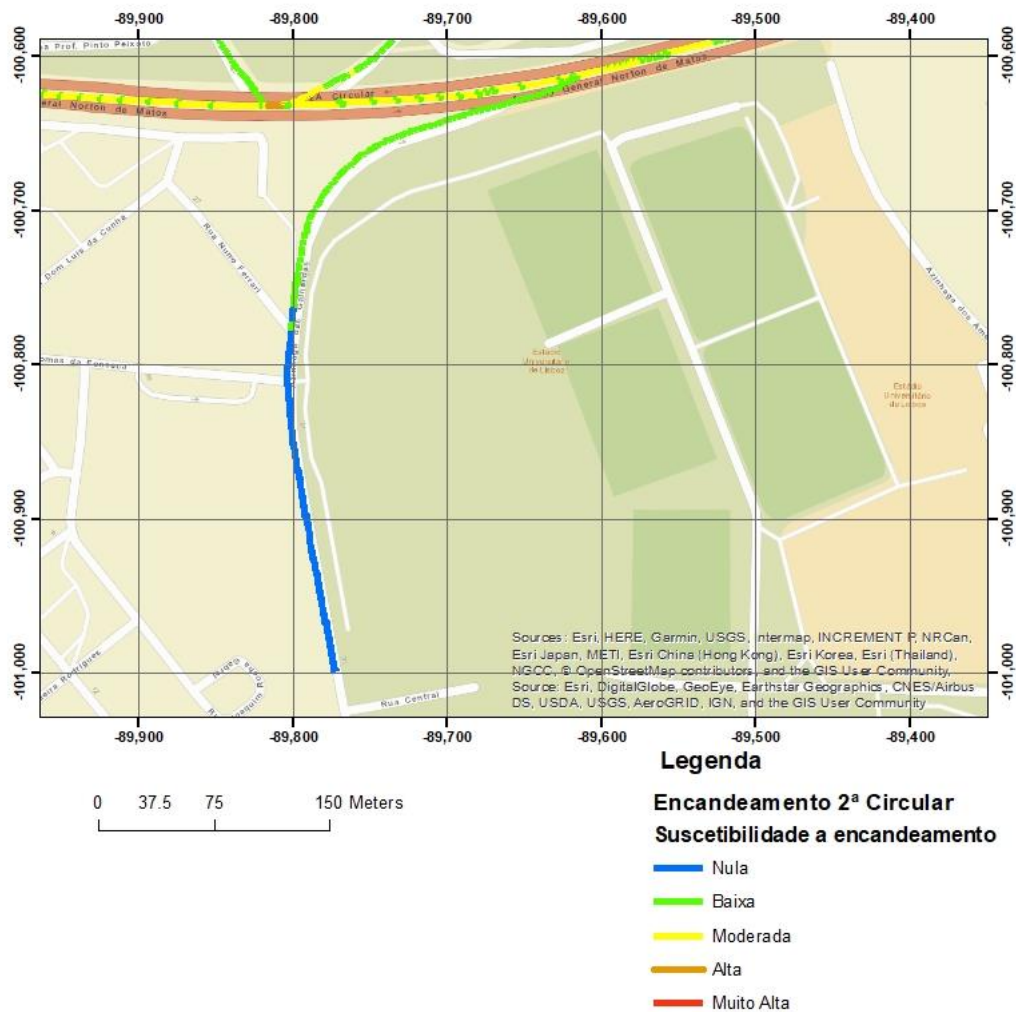


Figura 37 - Suscetibilidade a encandeamento solar no troço 55_57

O gráfico da matriz temporal para este troço, gráfico 6, exhibe resultados não expectados face à geometria do percurso.

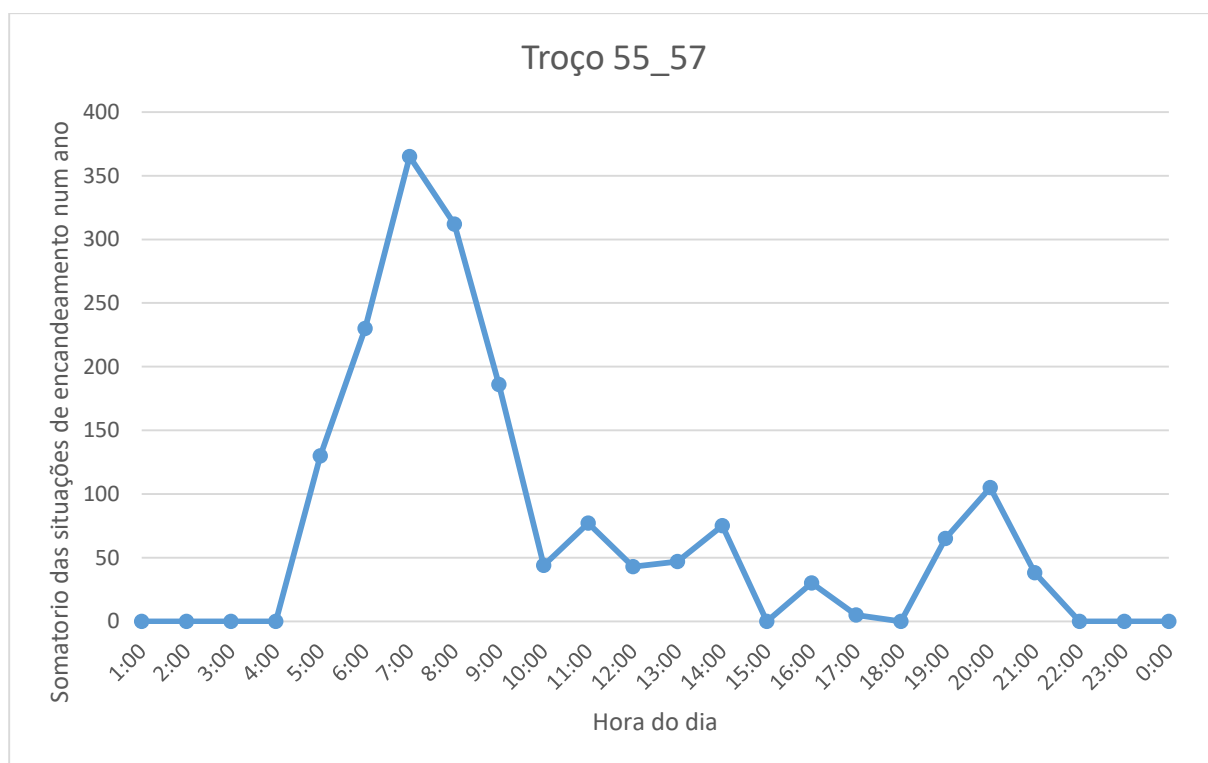


Gráfico 6 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 55_57

O gráfico 6 apresenta até às 10:00 o comportamento expectado de um troço com a geometria da Rua da Azinhaga das Galhardas, todavia a partir deste período apresenta valores de fenómenos de encandeamento solar oscilantes, chegando a 0 às 18:00 e voltando a subir atingindo um pico de 105 fenómenos de encandeamento solar às 20:00.

Para perceber a razão deste acontecimento, foram consultados os mapas de encandeamento solar para o troço referido às horas em que não é expectável que ocorram fenómenos de encandeamento solar, um exemplo deste mapa encontra-se na figura 38.

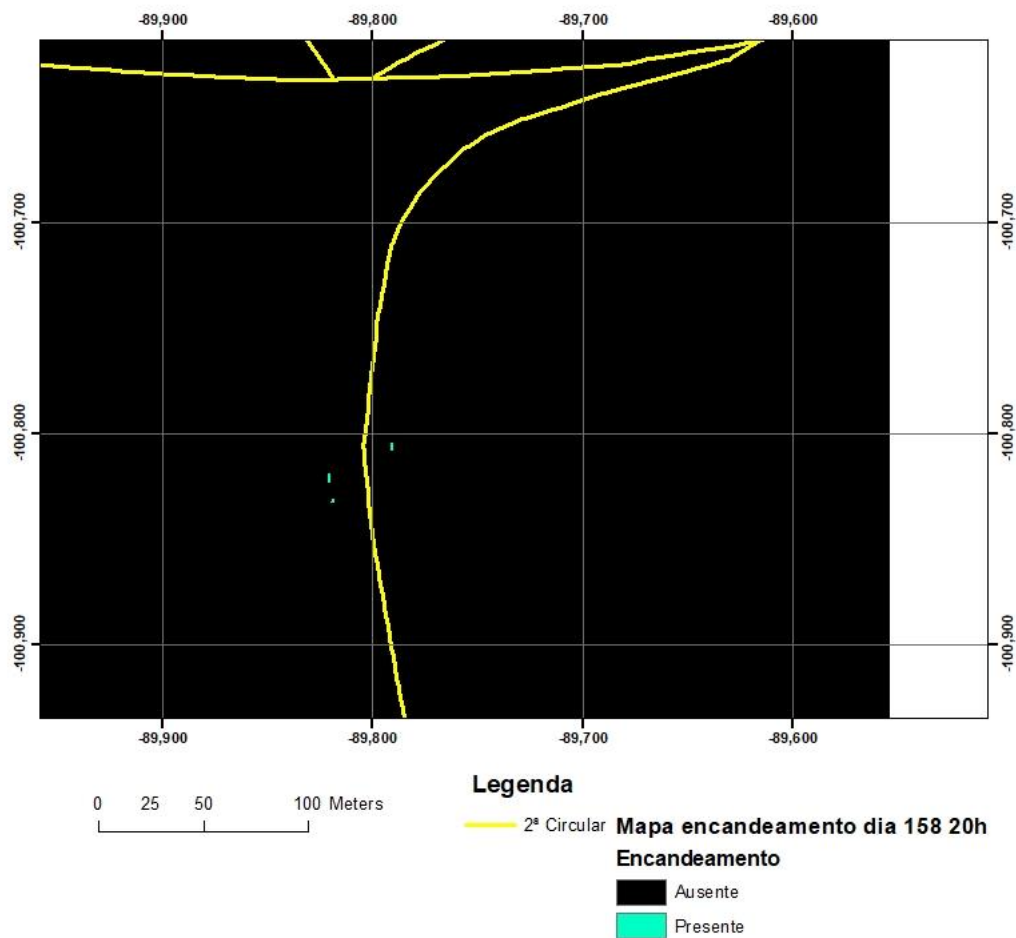


Figura 38 - Fenómenos pontuais de encandeamento no troço 55_57

A figura exemplifica a razão da oscilação do gráfico da matriz temporal para este troço. Como a matriz temporal só contabiliza se na *bounding box* do troço existe presença de encandeamento solar, possíveis erros de processamento como os exemplificados na figura 38 comprometem o que ocorre realmente no troço.

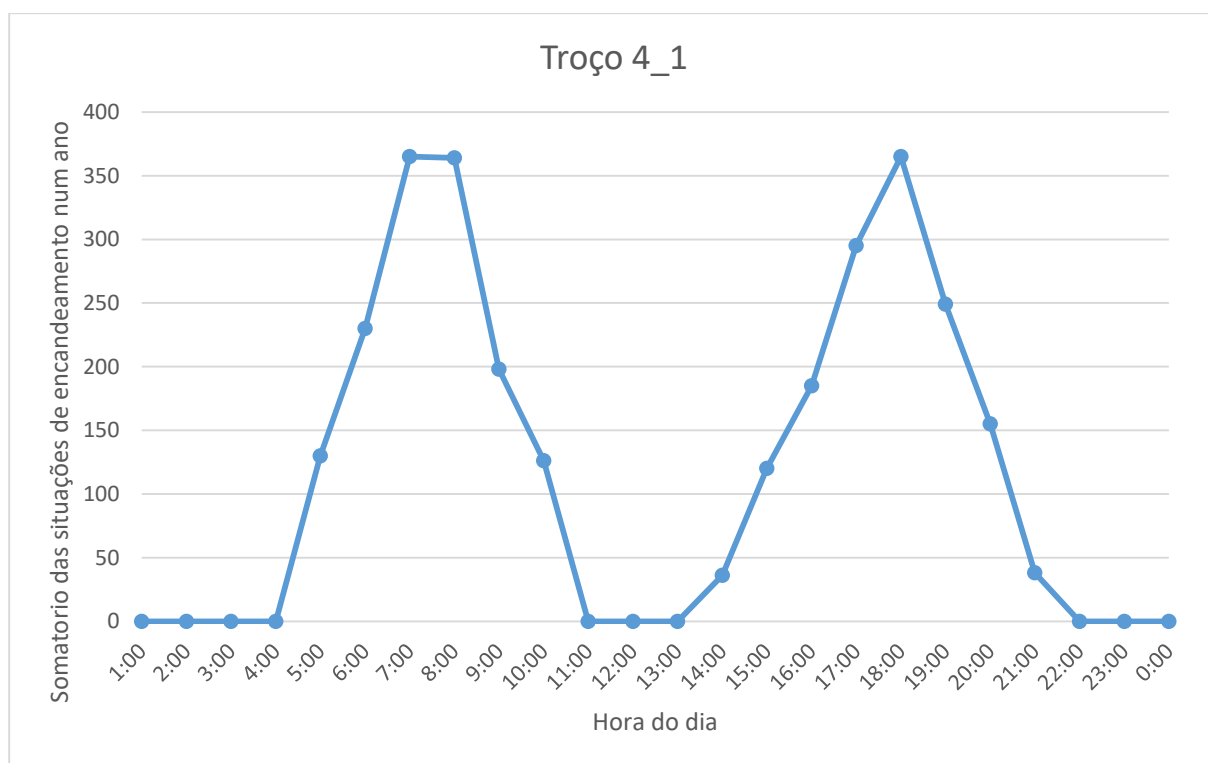


Gráfico 7 - Fenómenos de encandeamento solar ao longo de um ano no troço 4_1

Face à direção que o troço 4_1 apresenta, os resultados do gráfico 1 são os resultados expectáveis, dois picos de encandeamento, um no período de manhã para os condutores que circulam na direção IC19 – A1, e outro no período do final da tarde, no sentido A1 – IC19.

O mapa de suscetibilidade do troço 4_1, figura 40, ilustra como se desenvolve o encandeamento solar ao longo do troço.

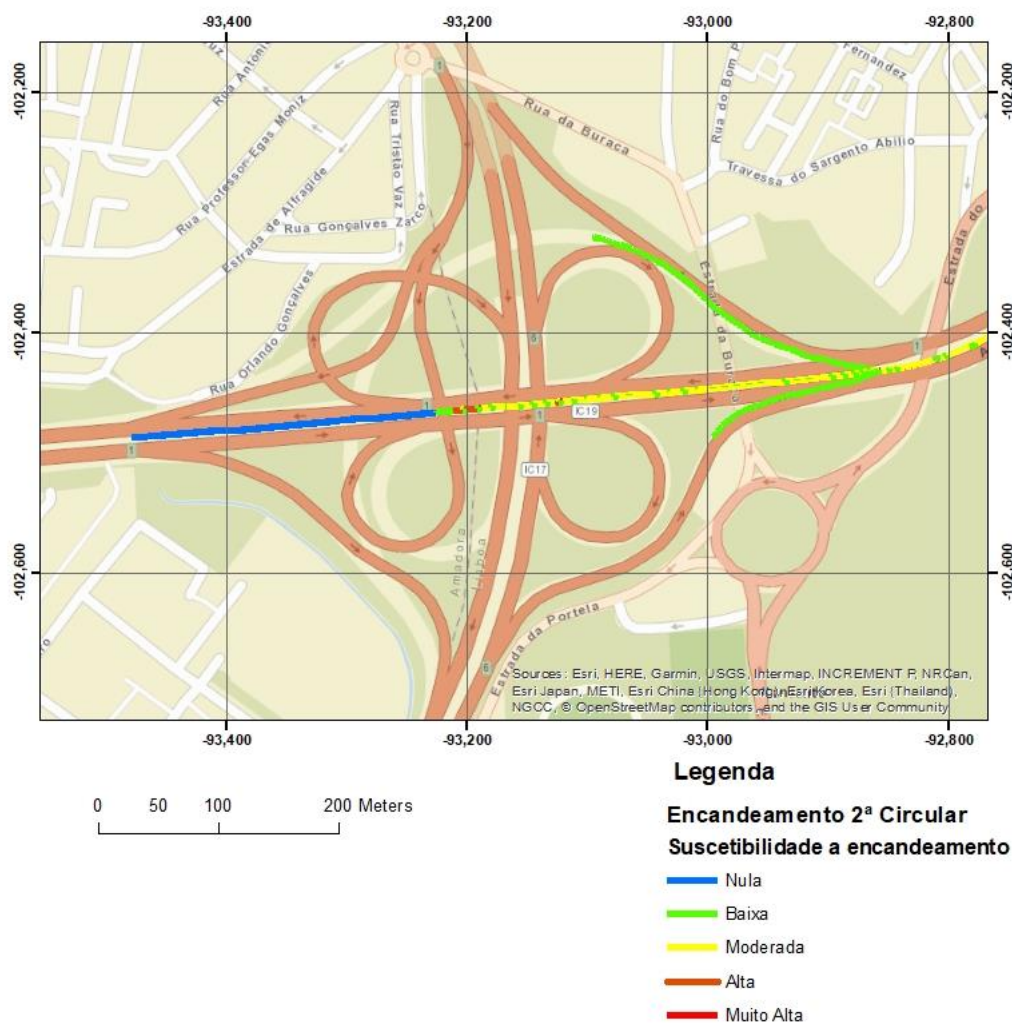


Figura 40 - Suscetibilidade a encandeamento solar no troço 4_1

A quase totalidade de troço com suscetibilidade a encandeamento solar moderada ilustra o quão vulneráveis a encandeamento solar estão os condutores que circulam nesse troço. É também dos poucos troços em que existe vulnerabilidade alta no seu percurso. A faixa inicial de troço com vulnerabilidade nula deve-se ao facto de não haver dados MDT nem MDS para essa zona, logo não foi possível calcular a suscetibilidade a encandeamento solar para aquela faixa do troço.

3.5 – Acidentes rodoviários na 2ª Circular e encandeamento solar

Uma das possíveis consequências do encandeamento solar rodoviário é serem a causa de acidentes, quer por forma de embate num veículo que se encontre em frente e / ou atropelamento de peões. Assim, é importante perceber se as classes de suscetibilidade a encandeamento solar mais elevadas se correlacionam com um maior número de acidentes. Para isto foram utilizados dados da localização geográfica dos acidentes rodoviários de 2005 a 2014, fornecidos pela ANSR (Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária) e o mapa de suscetibilidade da 2ª Circular criado no capítulo 3.4.

A figura 41 ilustra os acidentes na área da 2ª Circular e sua envolvente, para o período considerado. De referir que apenas os acidentes ocorridos em 2014 são georreferenciados nas suas coordenadas reais, os restantes acidentes apresentavam uma georreferenciação relativa, podendo apenas ser localizados sobre a via correspondente e não necessariamente na sua localização exata.

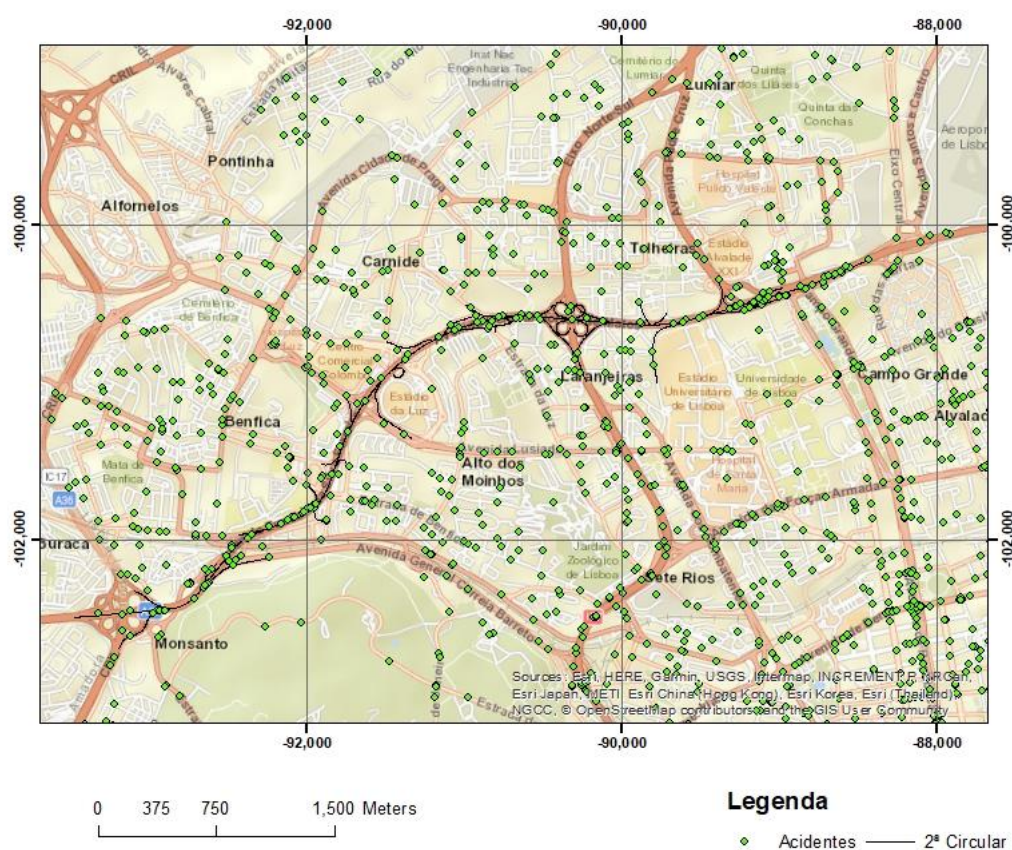


Figura 41 - Acidentes na 2ª Circular e sua envolvente

Para estabelecer uma ligação entre os acidentes na 2ª Circular e a suscetibilidade a encandeamento solar, foi necessário criar um *buffer* de 15 metros da *shapefile* da suscetibilidade a encandeamento solar e em seguida a intersecção espacial desse novo *buffer* com as *shapefiles* de pontos dos acidentes. A operação de *buffer* foi realizada uma vez que, a *shapefile* da suscetibilidade a encandeamento solar na 2ª Circular consiste apenas no eixo de via.

Da *shapefile* de pontos dos acidentes rodoviários, foram removidos todos os acidentes que ocorreram no período das 22:00 às 05:00. Este período foi escolhido pois é quando os gráficos das matrizes temporais estão sempre a 0.

Uma vez realizada esta operação, é possível obter todos os acidentes que ocorreram na 2ª Circular no ano de 2014. Estes encontram-se na figura 42.

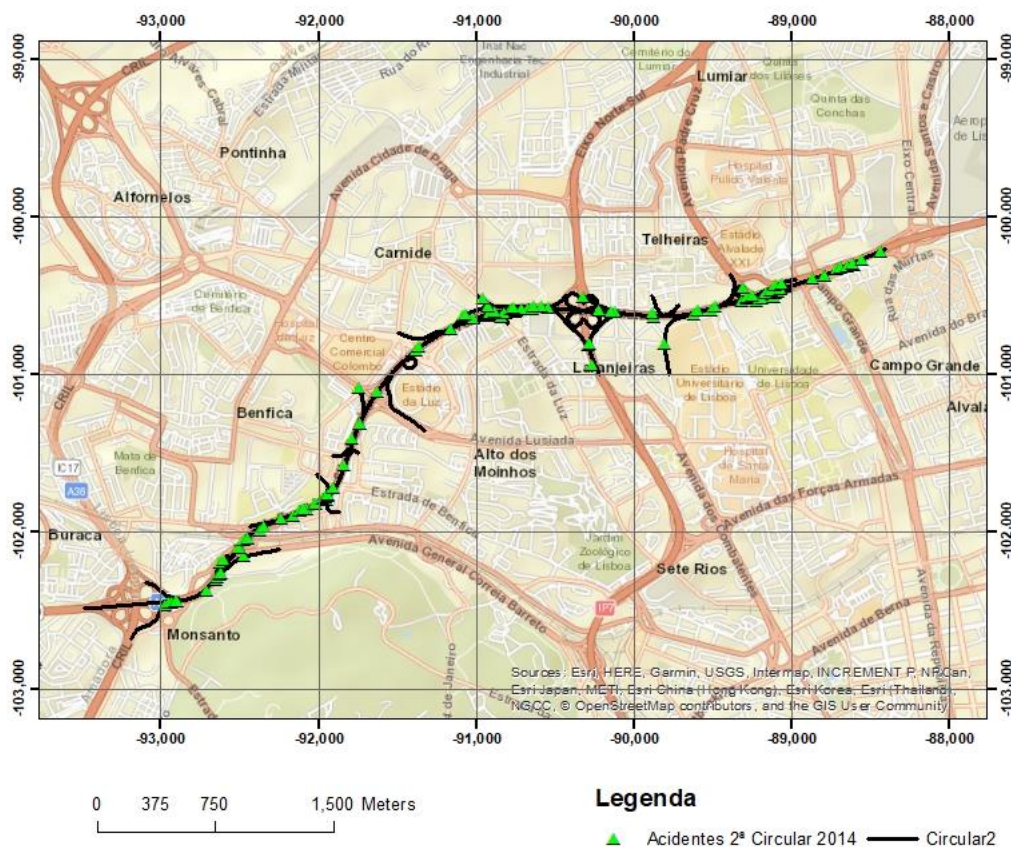


Figura 42 – Acidentes ocorridos nas faixas de rodagem da 2ª Circular no troço em estudo

Após este passo, contaram-se os acidentes que ocorreram por cada classe de suscetibilidade do troço a encandeamento solar. Estes resultados encontram-se no gráfico 8.

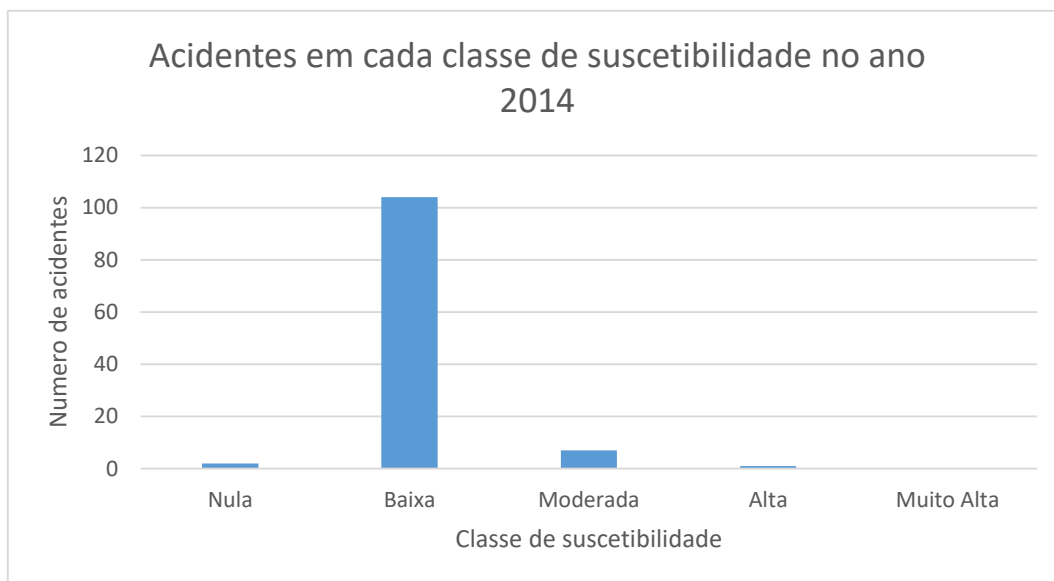


Gráfico 8 – Número de acidentes ocorridos em cada classe de suscetibilidade a encandeamento solar.

Com base nestes resultados, não é possível verificar se existe de facto ou não a existencia de uma correlação entre o encandeamento solar e o numero de acidentes. Ao adicionar um eixo que indica o numero de acidentes por cada km de classe de suscetibilidade, gráfico 9, é possível verificar que existe um maior numero de acidentes / km da classe alta em relação à moderada. Todavia os dados disponíveis e a área de estudo são demasiado pequenos para se estabelecer uma correlação entre as duas variaveis.

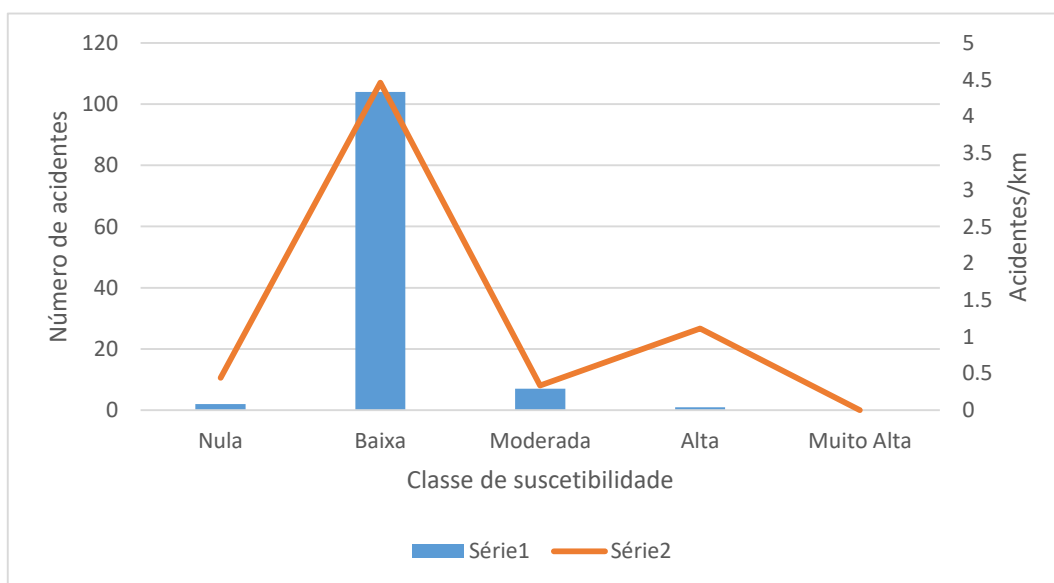


Gráfico 9 - Número de acidentes ocorridos em cada classe de suscetibilidade a encandeamento solar (Série 1) e número de acidentes por extensão de cada classe de suscetibilidade (Série 2).

4 – Discussão, conclusões, propostas de melhoria e perspectivas de trabalhos futuros

4.1 - Discussão

A metodologia desenvolvida no âmbito deste projeto provou ser capaz de satisfazer os objetivos propostos no capítulo 1.2. À semelhança de outros trabalhos descritos no capítulo 2 – Estado da arte, este estudo permitiu espacializar locais de encandeamento solar sobre uma das mais importantes artérias da cidade de Lisboa e classificar a zona de estudo em diferentes classes de suscetibilidade a encandeamento solar. Neste projeto, o algoritmo GLARE2019 calculou os diferentes mapas de encandeamento solar e matrizes temporais com intervalos de 1h. No entanto este algoritmo é capaz de calcular os mapas de encandeamento com os intervalos de tempo que o utilizador desejar, afetando só o tempo de processamento necessário para o cálculo e o número de ficheiros de *output* que o algoritmo gera, bem como a dimensão das matrizes temporais.

Comparando com outros trabalhos realizados sobre a mesma temática, apenas o trabalho de Kjetil Aune segue uma metodologia com resultados semelhantes aos apresentados neste projeto. Todavia, existem algumas diferenças que distinguem os dois projetos realizados. Aune utiliza no seu projeto uma abordagem *all-in-one*, onde apenas utiliza uma ferramenta, o software QGIS com o *plugin* do sistema de deteção de encandeamento solar, de forma a calcular a presença de encandeamento solar nas estradas, enquanto que a metodologia descrita neste estudo utiliza duas ferramentas distintas e um algoritmo, o software QGIS e ArcMap e o algoritmo GLARE2019 respetivamente, de forma a calcular a presença de encandeamento nas estradas. O método proposto por Aune é, por outro lado, mais limitado na sua aplicação uma vez que necessita como *input* um ficheiro vetorial no formato “.sosi”. Este formato foi desenvolvido pela autoridade norueguesa do mapeamento e cadastro (Aune, 2017). Ao nível de resolução, os dados usados por este autor são também menos precisos que os dados usados neste relatório uma vez que utiliza modelos de elevação de terreno com uma resolução inferior (10m) à utilizada neste trabalho (1m). Outra diferença crucial entre as duas metodologias é a aplicabilidade em contexto urbano. No projeto realizado, além do uso de dados de altimetria do terreno através do modelo digital de terreno são utilizados também os dados de superfície através do modelo digital de superfície sendo este modelo mais fiel à realidade do terreno, principalmente no contexto urbano, devido ao edificado que pode ter influência no encandeamento devido às sombras projetadas na via.

O estudo que aqui se apresenta é também inovador quanto à produção de uma cartografia suscetibilidade a encandeamento solar dos troços das vias urbanas. Este é um ponto importante para a realização de trabalhos futuros, como a averiguação de correlação entre acidentes e encandeamento solar rodoviário, à semelhança do que foi realizado no capítulo 3.5

4.2 – Conclusões

A temática do encandeamento solar rodoviário é uma temática que sofre de uma escassez de estudo para a gravidade que pode causar aos condutores em caso de acidentes. Este fenómeno de encandeamento rodoviário assume uma gravidade ainda maior devido ao grande tráfego automóvel nas estradas durante as horas em que o sol se encontra numa altura mais baixa. A melhor forma de evitar ou minimizar os efeitos causados pelo encandeamento solar continuam a ser os comportamentos preventivos como o uso de óculos de sol e o uso de para-sois dos veículos. Contudo, os resultados obtidos a partir desta metodologia em combinação com o algoritmo GLARE2019 poderão ser úteis a nível de prevenção rodoviária. A conjugação desta metodologia com diversas ferramentas tecnológicas, como, por exemplo,

alertas para os telemóveis dos condutores ou sistemas de navegação dos veículos, a avisar da possibilidade de estar sujeito a encandeamento naquele local àquelas horas. As vias mais problemáticas, ou seja, com maior recorrência de fenómenos de encandeamento, poderão também ter algum tipo de sinalética própria que advertisse os condutores do perigo de encandeamento. Nesta linha de pensamento, esta informação também poderia ser disponibilizada nos painéis elétricos horizontais que se encontram nas estradas com informação de trânsito.

Uma das questões a que a metodologia descrita neste relatório é capaz de responder, são os acidentes em que é alegado existirem condições encandeantes no local. Com a metodologia proposta neste trabalho é possível obter informação se em determinado dia, a determinada hora, existiam condições de encandeamento em determinado troço de via e gerar um mapa de encandeamento para esse dia e hora na localização do acidente, verificando assim se estavam de facto presentes condições de encandeamento ou não.

Em suma, a metodologia proposta neste relatório de projeto foi capaz de responder satisfatoriamente aos objetivos propostos na introdução, sendo uma metodologia útil para o combate da sinistralidade rodoviária.

4.3 – Propostas de melhoria

Ao longo do capítulo anterior foi possível verificar que a metodologia utilizada neste projeto é capaz de produzir os resultados esperados, no entanto esta metodologia pode e deve ainda ser melhorada. Um exemplo de uma possível melhoria seria no cálculo do valor do Z_{final} e subsequentemente cálculo do declive, apresentada no capítulo 3.2.2. A metodologia proposta não considera se, no cálculo do declive entre o $Z_{inicial}$ e o Z_{final} se estes pertencem ao mesmo troço grande. Esta situação originou erros de declive sempre que existia uma mudança de troço grande como é evidenciado no capítulo 3.2.3 na figura 12, levando à necessidade de criar um *script* que efetuasse uma média do valor do declive caso fosse superior ou inferior a um valor máximo/mínimo baseado nos troços anteriores e posteriores, de forma a corrigir os erros, minimizando o problema. Se no cálculo dos valores de Z_{final} fosse tido em conta se os dois valores de Z estivessem apenas no mesmo troço grande, esse erro não era cometido.

Ainda sobre o modelo sugerido existe uma clara abstração da componente espacial no mesmo. Seria importante que os *buffers* produzidos da rede viária tivessem dimensão variável, dependendo do ambiente externo, contexto urbano com edificado de ambos os lados ou um ambiente mais rural com vegetação ou ausência de vegetação junto à rede viária e da própria classificação da rede, se uma estrada municipal ou uma autoestrada. Ao aplicar esta contextualização da componente espacial, poderia ser possível obter resultados mais precisos e possivelmente menos pesados computacionalmente, uma vez que num ambiente mais rural não seria necessário a utilização de uma faixa do MDS tão extensa para além da faixa de estrada como a utilizada neste projeto, 65m.

Finalmente na última parte do projeto, onde são produzidas as matrizes anuais de encandeamento para um troço grande e subsequentes gráficos, existe uma inflação de situações de encandeamento que não são justificadas. Este problema é evidenciado no capítulo 3.4.3. Na figura 43 pode-se observar na totalidade do troço as situações de encandeamento e na figura 44 uma figura com uma resolução maior de forma a perceber o problema.

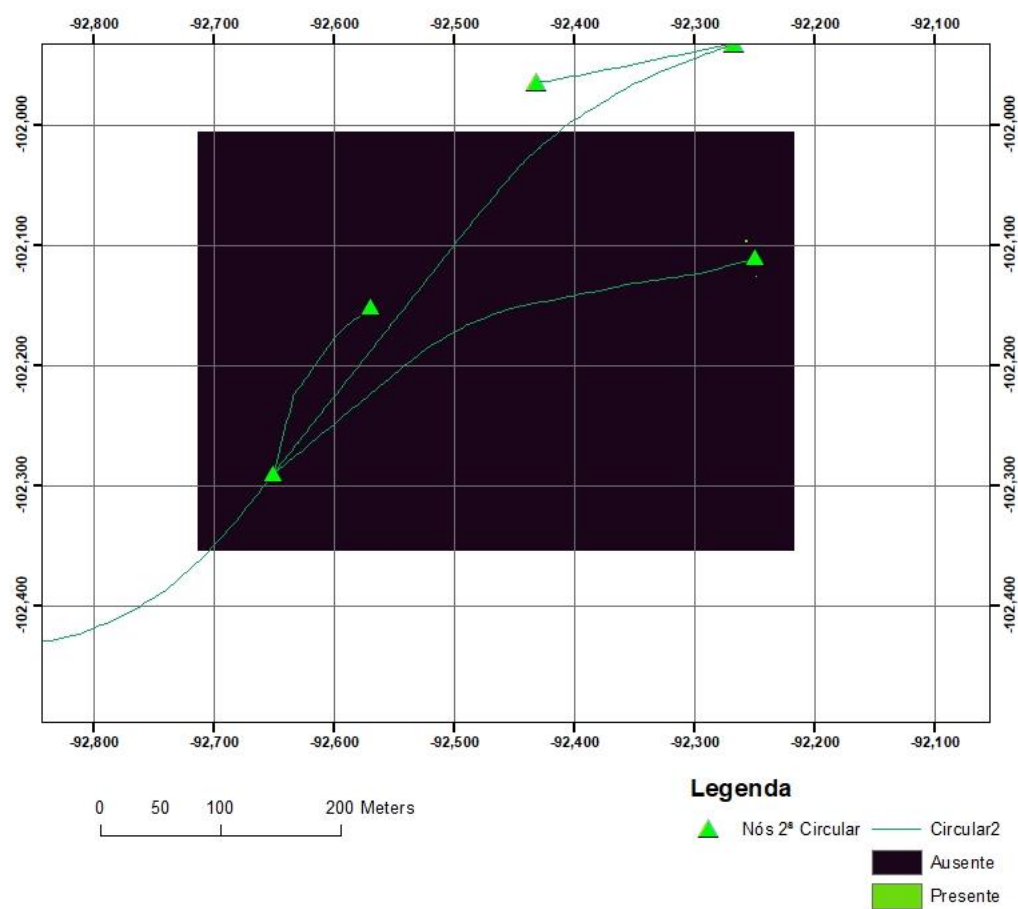


Figura 43 - Exemplo de um mapa de encandeamento com reduzido número de píxeis em que se verifica encandeamento

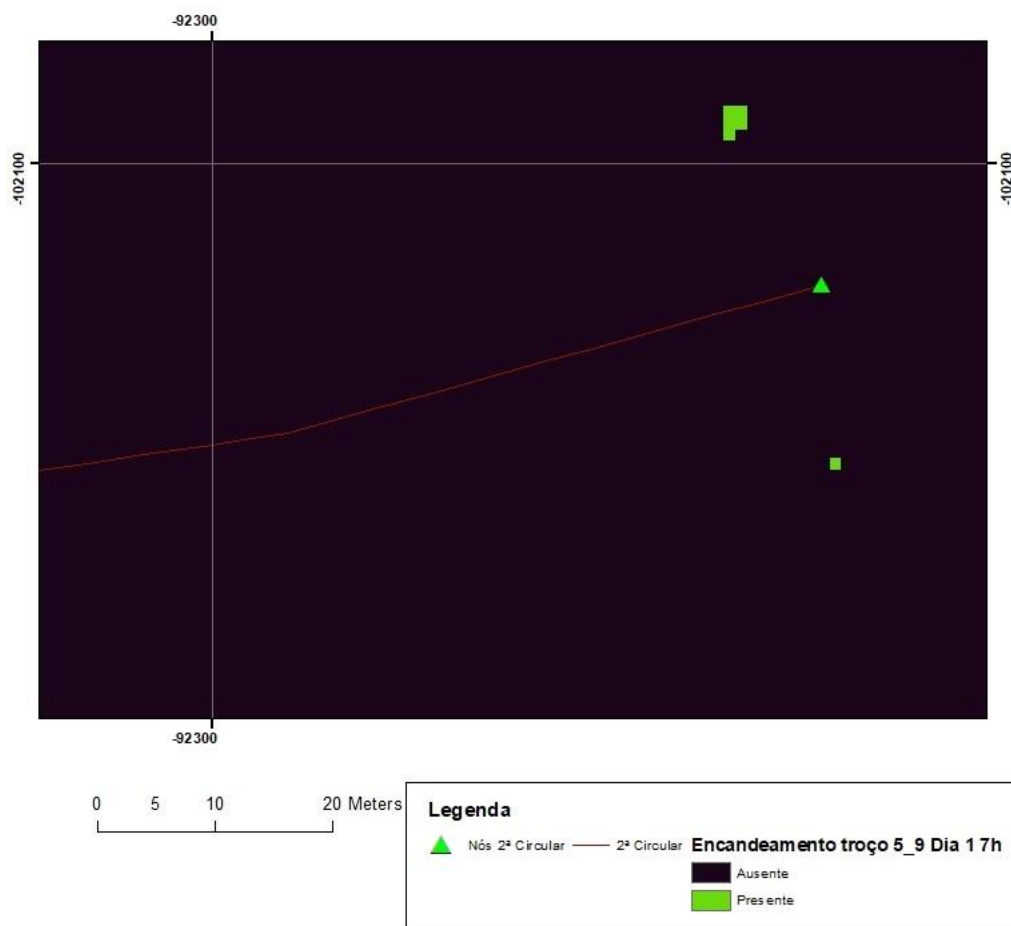


Figura 44 - Exemplo de um mapa de encandeamento com reduzido número de *pixels* em que se verifica encandeamento. Maior resolução

Na figura 45 estão contabilizados o número de *pixels* em que está presente encandeamento neste troço no dia 1 às 7h.

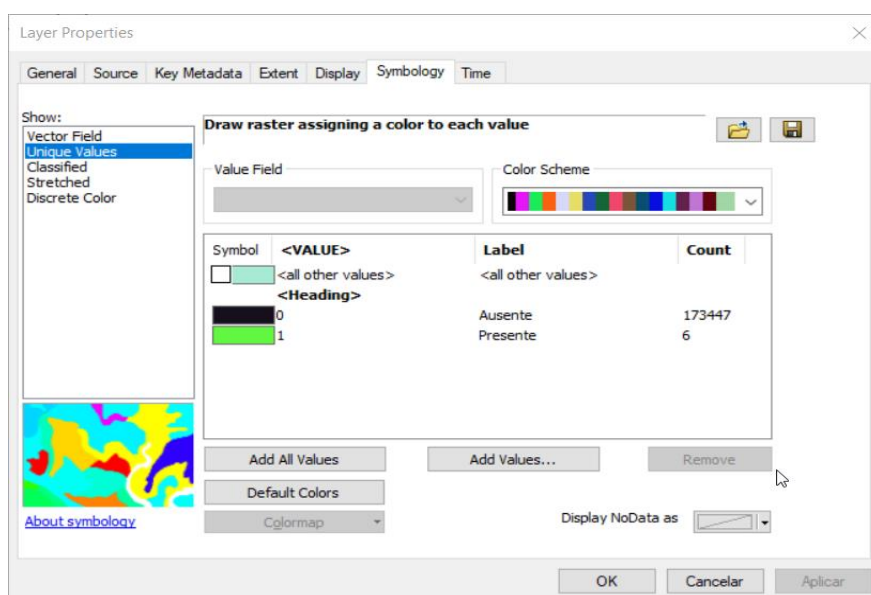


Figura 45 - Número total de *pixels* em que se verifica encandeamento para o troço 5_9 no dia 1 às 7 da manhã.

Como é possível verificar especialmente, na figura 44, existem apenas 6 *pixels* em toda a extensão do troço que estão sujeitos a encandeamento. Esta situação não é problemática para a classificação de suscetibilidade de cada troço grande ao longo do troço, porém, numa análise temporal para cada troço grande, estas situações de encandeamento de apenas alguns pixéis aumentam o número total de encandeamento sem serem situações de encandeamento significativas. Existem duas soluções para este problema, a primeira seria limitar o *output* do algoritmo GLARE2019 de modo a que apenas produzisse um mapa de encandeamento, caso as situações de encandeamento fossem por exemplo superiores a determinado valor da totalidade de *pixels* do mapa. Outra solução seria criar um *script* que removesse as entradas da matriz temporal de cada troço grande sempre que situações destas se verificassem.

4.4 – Perspetivas de trabalhos futuros

Com a grande quantidade de informação que é gerada com este trabalho é possível realizar inúmeros trabalhos. Desde logo, o cruzamento de dados da sinistralidade rodoviária georreferenciados com os dados produzidos neste trabalho de forma a perceber se realmente existe uma correlação entre os acidentes rodoviários e o encandeamento solar. Outra possibilidade seria a de fazer um estudo mais pormenorizado para diferentes estações do ano ou períodos de tempo mais ou menos longos. Uma outra aplicação desta metodologia seria de criar um modelo dinâmico de como evolui o encandeamento solar nas estradas, isto poderia ser alcançado produzindo mapas de encandeamento para cada minuto e fazer corresponder cada mapa a um *frame* de um vídeo, originando assim um vídeo da evolução do encandeamento solar ao longo de uma via.

5 - Referências bibliográficas

Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, (2013). *Anuário de Segurança Rodoviária 2013* Disponível em:

<http://www.ansr.pt/Estatisticas/RelatoriosDeSinistralidade/Documents/2013/Relat%C3%B3rio%20Anual-%20V%C3%ADtimas%20a%2024%20horas/Relat%C3%B3rio%20Nacional%20Anual%202013-%20V%C3%ADtimas%20a%2024%20horas.pdf> (Acedido em 10 de janeiro de 2019)

Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, (2017). *Relatório de Sinistralidade Distrito de Lisboa Dezembro 2017* Disponível em:

<http://www.ansr.pt/Estatisticas/RelatoriosDeSinistralidade/Documents/2017/RELAT%C3%93RIO%20ANUAL%20-%20V%C3%8DTIMAS%20A%2024%20HORAS/Lisboa%202017%2024h.pdf> (Acedido em 10 de janeiro de 2019)

Aune, K., (2017). ‘Sun Glare Detection and Visualization’. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/84af/2b1c9796100f902614e64f6c5898e9878412.pdf> (Acedido em: 20 de Janeiro de 2019)

Choi, E. & Singh, S., (2005). ‘Statistical assessment of the glare issue—Human and Natural Elements.’ Proc., 2005 FCSM Conf., Federal Committee on Statistical Methodology, Arlington, VA.

Cline, D. & Hofstetter H.W. (1997). *Dictionary of Visual Science. 4th Edition*. Butterworth-Heinemann, Boston, Massachusetts.

Direção Geral da Política de Justiça, (2013). *Os números da justiça 2013 - Principais Indicadores das Estatísticas da Justiça* Disponível em: http://www.dgpi.mj.pt/sections/noticias/teste-2013/downloadFile/attachedFile_f0/Os_numeros_da_Justica_2013.pdf?nocache=1419345504.82 (Acedido em 22 de Janeiro de 2019)

Ferro, C. & Coelho, R. (2018) Acidentes. Estes são os dez pontos negros em Lisboa *Diário de Notícias* [Online] Disponível em: <https://www.dn.pt/portugal/interior/segunda-circular-e-a-estrada-em-lisboa-com-mais-acidentes-e-mortos-9252380.html> (Acedido em 20 Abril 2019)

Hagita, K. & Mori K., (2013), *Analysis of the Influence of Sun Glare on Bicycle or Pedestrian Accidents with Turning Vehicle*, 13th World Conference on Transport Research.

Henriques, F. (2016). ‘Algoritmo Dinâmico de Encandeamento Solar Rodoviário em Contexto Urbano.’ Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa

Jurado-Pina, R., Pardillo-Mayora, J. M. and Jimenez, R. (2010): Methodology to Analyze SunGlare-Related Safety Problems at Highway Tunnel Exits, *Journal of Transportation Engineering*, No.6, p545-553

Li X., Cai B. Y., Qiu W., Zhao J. & Ratti C. (2018). ‘A novel method for predicting and mapping the presence of sun glare using Google Street View’ Disponível em: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1808/1808.04436.pdf> (Acedido em 10 de janeiro de 2019)